

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

4/382

2021

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., акад. РАЕ (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёрensen 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)
Царев А.П., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Воронеж)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

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

4/382

2021

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Н.Ф. Низаметдинов, П.А. Моисеев, И.Б. Воробьев. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин.....	9
В. Udval, S. Gerelbaatar, Ts. Dashzeveg, A.I. Lobanov. Seed Quality of <i>Larix sibirica</i> Ledeb. Depending on the Distance between Forest Areas and Pollution Sources around Ulaanbaatar City of Mongolia.....	23
Н.А. Демидова, Т.М. Дуркина, Л.Г. Гоголева, Н.Н. Васильева. Представители семейства сосновые (<i>Pinaceae</i> Lindl.) североамериканской флоры в коллекции дендрологического сада ФБУ «СевНИИЛХ».....	36
Н.Р. Пирцхалава-Карпова, А.А. Карпов, Е.Е. Козловский, М.Ю. Грищенко. Защита еловых лесов от вспышек <i>Ips typographus</i> (обзор).....	55
В.А. Кострикин, В.К. Ширнин, С.А. Крюкова. Критерии оценки плюсовых насаждений дуба.....	68
Б.А. Мочалов, С.В. Бобушкина. Лесокультурное производство – основа непрерывности лесопользования.....	80
В.И. Турусов, А.С. Чеканышкин, А.А. Лепёхин. Рост и состояние смешанных древостоев лесных насаждений Каменной Степи.....	97
Н.Р. Сунгурова, А.А. Дрочкова. Биометрические характеристики посадочного материала как тест-показатель успешности культур <i>Pinus silvestris</i> L.....	107

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

А.В. Абузов, П.Б. Рябухин. Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях.....	117
Р.Н. Ковалев, И.М. Еналеева-Бандура, А.В. Никончук. Оценка влияния пожаров на лесные экосистемы с учетом уровня развития лесотранспортной сети....	131
А.О. Боровлев, А.В. Скрыпников, В.Г. Козлов, Т.В. Тюрикова, О.Н. Тверитнев, В.В. Никитин. Математическое моделирование трассы лесовозных автомобильных дорог.....	150

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Н.А. Капустина, В.И. Малыгин, В.И. Мелехов, В.А. Слуцков. Моделирование дискретных контактов термодинамической системы элементов сборной дереворежущей фрезы.....	162
---	-----

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- А.А. Сосновская, В.Л. Флейшер.* Идентификация кристаллического продукта жидкофазного окисления α -пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II)..... 173
- К.Б. Воронцов, Н.И. Богданович, Е.Л. Седова, П.В. Соловьева.* Формирование адсорбционных свойств углеродных наноструктурированных материалов термохимической активации шлам-лигнина..... 181

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- В.С. Шалаев, В.К. Тепляков.* К итогам XXV Всемирного конгресса ИЮФРО..... 190
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>N.F. Nisametdinov, P.A. Moiseev, I.B. Vorobiev.</i> Laser Scanning and Aerial Photography with UAV in Studying the Structure of Forest-Tundra Stands in the Khibiny Mountains.....	9
<i>B. Udval, S. Gerelbaatar, Ts. Dashzeveg, A.I. Lobanov.</i> Seed Quality of <i>Larix sibirica</i> Ledeb. Depending on the Distance between Forest Areas and Pollution Sources around Ulaanbaatar City of Mongolia.....	23
<i>N.A. Demidova, T.M. Durkina, L.G. Gogoleva, N.N. Vasiljeva.</i> Representatives of the Pine Family (<i>Pinaceae</i> Lindl.) of the North American Flora in the Collection of the Dendrological Garden named after V.N. Nilov (NRIF).....	36
<i>N.R. Pirtskhalava-Karpova, A.A. Karpov, E.E. Kozlovski, M.Yu. Grishchenko.</i> Protection of Spruce Forests from Outbreaks of <i>Ips typographus</i> (Review).....	55
<i>V.A. Kostrikin, V.K. Shirnin, S.A. Kryukova.</i> Criteria for Assessment of Plus Oak Stands	68
<i>B.A. Mochalov, S.V. Bobushkina.</i> Silvicultural Production as a Basis for Continuity of Forest Management.....	80
<i>V.I. Turusov, A.S. Chekanyshkin, A.A. Lepekhin.</i> Growth and State of Mixed Stands of Forest Plantations of the Kamennaya Steppe.....	97
<i>N.R. Sungurova, A.A. Drochkova.</i> Biometric Parameters of Planting Material as a Test Indicator of Success of <i>Pinus silvestris</i> L. Plantations.....	107

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>A.V. Abuzov, P.B. Ryabukhin.</i> Technologies of Intermediate Felling in Difficult to Access Areas.....	117
<i>R.N. Kovalev, I.M. Enaleeva-Bandura, A.V. Nikonchuk.</i> Assessment of the Impact of Fires on Forest Ecosystems Considering the Level of Development of the Forest Transportation Network.....	131
<i>A.O. Borovlev, A.V. Skrypnikov, V.G. Kozlov, T.V. Tyurikova, O.N. Tveritnev, V.V. Nikitin.</i> Mathematical Modeling of the Route of Logging Roads.....	150

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>N.A. Kapustina, V.I. Malygin, V.I. Melekhov, V.A. Slutskov.</i> Modeling of Discrete Contacts for the Thermodynamic Element System of a Modular Wood-Milling Cutter.....	162
---	-----

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- A.A. Sosnovskaya, V.L. Fleisher.* Identification of the Crystalline Product of Liquid-Phase Oxidation of α -Pinene with Atmospheric Oxygen in the Presence of Cobalt (II) Stearate..... 173
- K.B. Vorontsov, N.I. Bogdanovich, E.L. Sedova, P.V. Solovyova.* Formation of Adsorption Properties of Carbon Nanostructured Materials by Thermochemical Activation of Sludge-Lignin..... 181

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- V.S. Shalaev, V.K. Teplyakov.* Towards the Results of the XXV IUFRO World Congress..... 190
-



УДК 528.854:630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И АЭРОФОТОСЪЕМКА С БПЛА В ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ ЛЕСОТУНДРОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ХИБИН

Н.Ф. Низаметдинов, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAI-3961-2020](https://orcid.org/0000-0001-9410-6807),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9410-6807>

П.А. Моисеев, д-р биол. наук; *ResearcherID*: [M-9132-2013](https://orcid.org/0000-0003-4808-295X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-295X>

И.Б. Воробьев, науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAK-3957-2021](https://orcid.org/0000-0002-2563-585X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2563-585X>

Институт экологии растений и животных УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202, г. Екатеринбург,
Россия, 620144; e-mail: niznail@yandex.ru

Аннотация. Изучение структуры древостоев является ключевым моментом в оценке роли деревьев в депонировании углерода. Информация о пространственной структуре напочвенного покрова на верхней границе леса, особенно чувствительной к изменениям климата, представлена в современных исследованиях недостаточно. Детальное дистанционное зондирование может стать источником данных, которые помогут понять свойства и динамику растительности в этих условиях. Проверена применимость наземного мобильного лазерного сканирования местности и аэрофотосъемки для быстрой и высокоточной оценки показателей насаждений в лесотундровом экотоне. При помощи этого метода получены цифровые модели лесного полога, дополненные впоследствии материалами аэросъемки исследовательского полигона на юго-восточном склоне Хибинских гор. На основе данных моделей определены границы крон деревьев. Для каждого из них найдены высота и площадь проекции кроны. Для верификации первый показатель, полученный лазерным сканированием, сопоставлен с высотами этих же деревьев, оцененными натурными измерениями. Сравнение выявило, что данные лазерного сканирования позволяют устанавливать значения высот, наиболее близкие к данным натурных измерений, если высоты определяются по максимальным показателям яркости пикселей цифровых моделей лесного полога с ручной корректировкой значений при обнаружении выбросов ($R^2 = 0,84$). Поскольку ручная корректировка требует большого времени, предложен способ автоматизации измерений путем определения высот деревьев по сумме среднего значения яркости пикселей и стандартного отклонения, умноженного на 2,5 ($R^2 = 0,79$). Площадные характеристики древостоев, определенные лазерным сканированием, были сопоставлены с данными фотосъемки с беспилотного летательного аппарата. Исследования дали подробную информацию о пространственном расположении и размерах 4424 деревьев на площади около 10 га и позволили сравнить результаты измерения характеристик деревьев, полученных разными методами. Также выявлено, что с увеличением высоты от 290 до 425 м над ур. м. на изученном склоне средняя высота древостоев снижается постепенно от 4,5–5,0 до 1,1–1,6 м с небольшими флуктуациями (0,2–0,4 м), в то время как сомкнутость древостоев изменяется от 4620–5860 до 145 м²/га нелинейным образом.

Для цитирования: Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

Финансирование: Сбор и анализ данных выполнен за счет средств гранта Российского научного фонда № 17-14-01112, подготовка текста и рисунков – за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-14-00137.

Ключевые слова: лазерное сканирование, аэрофотосъемка, цифровая модель рельефа, цифровая модель местности, цифровая модель лесного полога, сегментация, верхняя граница леса, Хибины.

Введение

Многие исследователи, изучавшие древесную растительность на верхнем пределе ее распространения в различных горных регионах мира, отмечают интенсивное лесовозобновление и существенное смещение вверх по склонам границ редколесий и сомкнутых лесов в течение последних 60–80 лет на фоне глобального потепления [4, 10]. При оценке параметров отдельных деревьев и древостоев в таких работах использовались в основном натурные измерения, которые, как правило, требовали больших временных затрат [1, 2, 9]. В условиях короткого лета и плохой транспортной доступности в горных районах трудно рассчитывать на значительный охват измерений и репрезентативность получаемых сведений. Ставшее традиционным в последние десятилетия широкомасштабное использование материалов спутниковой съемки для изучения структуры древостоев ограничивается пространственным (максимум 0,3–0,5 Мп) и временным разрешением аппаратов, а в горах еще и высокой облачностью района [12, 17]. Относительно недавно для исследования древесной растительности в условиях полярной и верхней границы леса (ВГЛ) стали применяться материалы фотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5] и наземного лазерного сканирования местности [16].

Данные съемки с БПЛА обладают очень высоким пространственным разрешением (0,05–0,20 Мп) по сравнению с материалами спутниковой съемки и могут быть доступны достаточно быстро (в течение нескольких дней). Автоматизированная фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков позволяет получать детальные ортофотопланы и трехмерные облака точек изучаемой местности [3]. Благодаря этому можно иметь сравнительно точную информацию о размерах наземных объектов. Однако фотограмметрическая обработка применяется только при достаточно низкой сомкнутости древостоев, так как при их высокой густоте не просматриваются основания объектов и земная поверхность, что не позволяет создать высокоточную цифровую модель рельефа (ЦМР) [15].

В ряде подобных исследований в последние годы стал применяться анализ результатов наземного лазерного сканирования [7, 14]. Эта технология основана на получении при помощи специальных устройств (лидаров) большого количества точек-отражений с высоким пространственным разрешением (0,01–0,03 м), что позволяет достаточно точно определять взаиморасположение объектов и оценивать морфометрические параметры отдельных деревьев, даже

при высокой сомкнутости древостоев. Но несмотря на все преимущества описанных выше методов, результаты наблюдений требуют верификации по данным прямых измерений в полевых условиях [14].

Цель работы – исследование применимости методов наземного мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА для ускоренного получения точных размерных характеристик отдельных деревьев и древостоев, произрастающих на верхнем пределе распространения, а также верификация этих характеристик по натурным измерениям.

Объекты и методы исследования

Район исследований – юго-восточный макросклон горного массива Хибин (рис. 1), расположенный в полосе наиболее высоких центральных возвышенностей Кольского п-ова, максимальные отметки которого находятся в пределах 900...1200 м над ур. м. Для данной местности характерны большие перепады высот (до 800 м), сложная геологическая структура, влажный климат (до 1200 мм осадков в год), ярко выраженная высотная ландшафтная поясность. Экотон ВГЛ в Хибинах располагается на высоте 300...600 м над ур. м. Произрастающие в его пределах древостои в основном сформированы березой извилистой (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa* (Ledeb.) Nyman) с примесью ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

В июле 2017 г. для изучения структуры древостоев в экотоне ВГЛ на юго-восточном склоне г. Китчепакк были заложены пробные площадки размером 20 × 20 м – по 2 в верхней (410–450 м над ур. м.), средней (350–380 м над ур. м.) и нижней (320–340 м над ур. м.) его частях.



Рис. 1. Местоположение района исследований в пределах Российской Федерации (1), Кольского п-ва (2), массива Хибин (3), юго-восточного склона г. Китчепакк (4)

Fig. 1. Location of the research area within the Russian Federation (1), the Kola Peninsula (2), the Khibiny Mountains (3), and the southeastern slope of Kitchepakhk Mountain (4)

Для каждого произрастающего на них отдельного дерева (одноствольной и многоствольной форм роста) устанавливали: вид, местоположение на площадке, высоту (градуированным 6-метровым шестом) и диаметр – у основания и на высоте груди – ствола (через периметр, определенный измерительной лентой), а также диаметр проекции кроны по двум направлениям и жизненное состояние.

В июле 2018 г. осуществлялось наземное лазерное сканирование древостоев с помощью мобильного комплекса Л-СКАН-1 (Geomatics Ltd.). Входящий в его состав лазерный 3D-сканер Velodyne VLP-16 имеет следующие характеристики: длина волны луча – 905 нм, скорость измерений – 0,3 млн точек в секунду, дальность сканирования до 100 м. Комплекс устройств позволил получить только локальные (X, Y, Z) координаты изучаемых объектов в метрических величинах, без географической привязки. Материалы съемки представляли собой набор файлов в формате *pcap*. В каждом из них содержалась информация, соответствующая 1 мин сканирования. Для последующей обработки весь объем данных сгруппировали в 5-минутные *pcap*-файлы в программе WireShark 3.0.1. Далее в программе VeloView 3.5.3-317-gafd3ffe 64-bit они были преобразованы методом SLAM (simultaneous localization and mapping – одновременная локализация и построение карты) в единое облако точек-отражений в формат LAS [8].

Постобработка результатов сканирования производилась в программе Lidar360 Version 3.2 (Green Valley International Ltd). На 1-м этапе каждый 5-минутный фрагмент был очищен от точек, расположенных вне пределов основной области сканирования («выбросов»). Далее выполнена процедура классификации множества точек-отражений лазера на 2 типа: точки поверхности земли и остальные вышерасположенные точки [7]. По точкам первого типа построена ЦМР (DEM – digital elevation model, или по-другому DTM – digital terrain model). На следующем этапе создана цифровая модель местности (ЦММ, DSM – digital surface model), содержащая пространственную информацию о положении поверхности всех объектов и участков земли между ними. Посредством исключения данных ЦМР из ЦММ была получена цифровая модель лесного полога (ЦМЛП, СНМ – canopy height model), представляющая собой изображение крон деревьев в растровом формате TIFF (рис. 2). При разработке всех трех моделей использован размер ячейки растра 0,01 м.

На 3-м этапе камеральной обработки создан ортофотоплан на основе сделанных в июле 2018 г. с высоты 50–100 м камерой квадрокоптеров DJI Phantom 4 и DJI MavicPro (с разрешением 20 Мп) фотографий с известными географическими координатами центров съемки. Для этого в среде программы Agisoft PhotoScan Pro 1.2. [3] последовательно осуществлены следующие операции: поиск на аэрофотоснимках одинаковых по конфигурации объектов (соответствий) и выравнивание фотографий относительно друг друга; генерирование на основе отдельных изображений плотного облака точек, для каждой из которых рассчитаны географические координаты [20]; создание ортофотоплана и карты высот (рис. 3) с пространственным разрешением 0,02–0,05 Мп и точной привязкой к местности.

Высокая четкость изображений на ортофотоплане и ЦМЛП позволили на основе программы «Квантум-ГИС» (QGIS 3.6.1) визуально определить идентичные объекты, что было использовано для геопривязки ЦМЛП (рис. 2 и 3). Далее в среде программы Lidar360 Version 3.2 выполнена сегментация геопривязанных растров ЦМЛП.

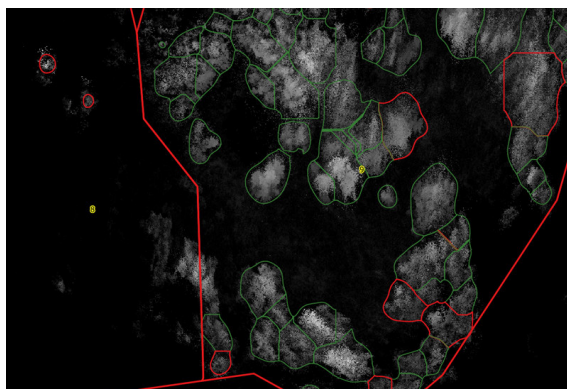


Рис. 2. ЦМЛП, привязанная к местности, и контуры крон деревьев, полученные в результате ее сегментации. Зеленая граница – максимальное значение яркости пикселей меньше порогового значения; красная граница – выше порогового значения

Fig. 2. CHM referenced to the terrain and the tree crown delineation obtained as a result of its segmentation. The green border of the polygons – the maximum value of the brightness of the pixels is less than the threshold value; the red border – the maximum value of the pixels brightness is higher than the threshold value



Рис. 3. Фрагмент ортофотоплана

Fig. 3. Fragment of the orthomosaic

В результате из общей поверхности точек сканирования выделены контуры крон деревьев на высоте 0,5 м от поверхности земли [7]. При этом использованы следующие параметры: размер ячейки растра – 0,01 м, радиус при гауссовом размывании – 205,00 ед., параметр сигма – 40,00 ед., минимальная высота деревьев – 0,30 м, максимальная – 80,00 м, высота основания кроны – 0,50 м. Результаты сегментации представлены в виде векторного полигонального слоя в формате SHP (см. рис. 5). Нахождение контуров крон деревьев позволило определить их площадь. Для оценки высоты объектов внутри каждого контура кроны рассчитаны статистики распределения яркости пикселей ЦМЛП

(среднее значение, стандартное отклонение, максимальное значение). Яркость пикселя в данном случае соответствовала высоте отсканированной точки над поверхностью земли.

В программе QGIS 3.6.1 по ортофотопланам визуально оцифрованы контуры крон отдельных деревьев и определена их видовая принадлежность (ель или береза), а также рассчитаны площади проекций крон (рис. 4).

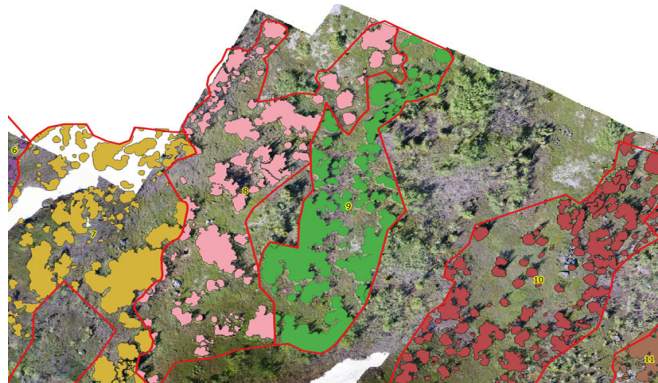


Рис. 4. Векторные слои проекций крон деревьев на высотных уровнях 1–13, использованные для расчета площадей проекций крон деревьев

Fig. 4. Vector layers of tree crown projections at altitude levels 1–13 used for calculation of the area of tree crown projections

В верхней части профиля (в тундре с отдельными деревьями) объединение материалов сканирования в единую поверхность точек программой VeloView было произведено некорректно, поэтому использование инструментария LiDAR360 для сегментирования объектов не представлялось возможным.

На данной территории отбор отдельных деревьев и фиксация их параметров выполнены на основе только ортофотопланов, созданных по аэрофотоснимкам. Для этого в программе QGIS 3.6.1 векторизованы контуры крон. Их диаметр определяли по площади проекции кроны; высоту каждого дерева – по длине тени, времени съемки и ее географическим координатам [18] (рис. 5).



Рис. 5. Фрагмент аэроснимка с выделенным контуром кроны и изображением тени дерева

Fig. 5. A fragment of the aerial photograph with a selected outline of the tree crown and the image of the tree shadow

Результаты исследования и их обсуждение

В пределах обследованного склона на площади около 10 га произведено картирование 4424 деревьев и определение их высот и площадей крон. Для оценки изменений пространственных характеристик древостоев территория была разделена на 19 высотных уровней (рис. 6). Их границы проходили через каждые 10 м высоты по изолиниям созданной на основе материалов аэрофотосъемки карты высот.

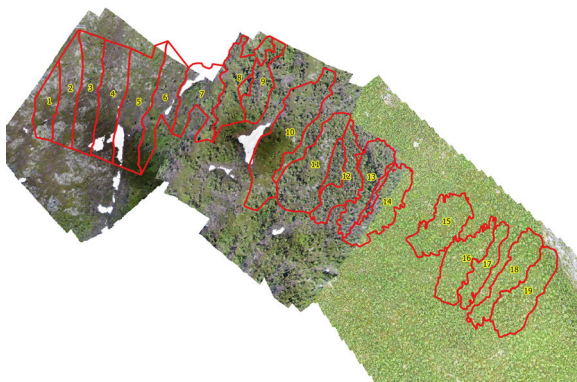


Рис. 6. Расположение границ высотных уровней

Fig. 6. Location of the boundaries of altitude levels

На уровнях 1–5 площади проекций крон деревьев и их высоты определены по аэрофотоснимкам. На уровнях 6–19 характеристики деревьев получены по данным лазерного сканирования. В итоге для каждого высотного уровня рассчитаны средняя высота над уровнем моря и площадь, а также сумма площадей проекций крон отдельных деревьев по данным аэрофотосъемки и/или результатам лазерного сканирования, средняя высота и густота древостоев.

Сравнение сумм площадей проекций крон деревьев, полученных разными методами (рис. 7), обнаружило тесную связь ($R^2 = 0,93$) указанных значений. Однако выявлено также определенное занижение величин в случае лазерной съемки по отношению к результатам визуального дешифрирования.

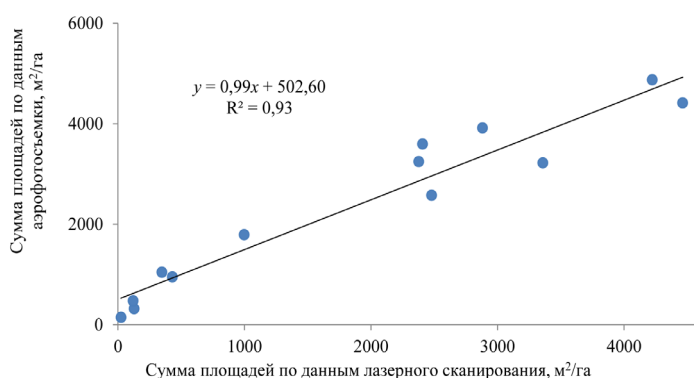


Рис. 7. Сравнение сумм площадей проекций крон деревьев на различных высотных уровнях, полученных разными методами

Fig. 7. Comparison of the sums of projection areas of tree crowns at different altitude levels obtained via laser scanning and aerial photographs

Это объясняется меньшей точностью определения площадей крон при автоматической сегментации и указывает на необходимость верификации результатов лазерной съемки другими данными (анализ аэрофотоснимков высокого разрешения, натурные измерения).

Для проверки точности определения высот по данным лазерного сканирования использована информация о высоте этих же деревьев, полученная натурными измерениями, сделанными на пробных площадках в 2017 г. Для этого предварительно в разных слоях в среде программы QGIS 3.6.1 сопоставлены изображения крон деревьев на картах схемах пробных площадок, полученные лазерным сканированием (рис. 8).

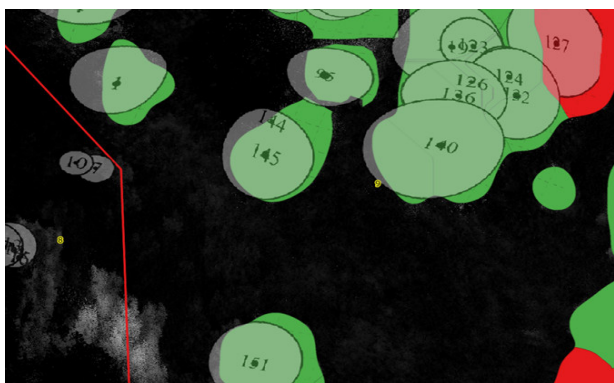


Рис. 8. Контуры крон деревьев, полученные натурными полевыми измерениями и привязанные к данным лазерного сканирования

Fig. 8. Tree crown delineation obtained by field measurements and referenced to laser scanning data

На первом этапе за высоту принималось значение пикселя, максимальное в распределении яркостей в растре ЦМЛП внутри контура кроны отдельного дерева (рис. 9). Этот подход обнаружил завышение высот у части деревьев в сравнении с данными натурных измерений, что объяснялось наличием «выбросов» вблизи крон, связанных с несовершенством алгоритма (программа VeloView3.5.3-317-gafd3ffe 64-bit) сборки материалов лазерной съемки в единый LAS-файл.

На последующем этапе выбросы были исключены из анализа путем расчета порогового значения высоты дерева на основании суммы среднего значения и стандартного отклонения, умноженного на 3:

$$P = M + 3Sdev, \quad (1)$$

где P – пороговое значение высоты дерева; M – среднее значение яркости пикселя; $Sdev$ – стандартное отклонение значений яркости пикселей.

Если максимальное значение яркости пикселя для дерева было выше порогового, то высота такого дерева признавалась завышенной и находилась путем визуального определения положения вершины раstra по самому яркому пикселю и «ручного снятия» значения высоты дерева в данном месте (рис. 9). В случае, когда максимальное значение яркости пикселя для дерева оказывалось ниже порогового, высота соответствовала максимальному значению яркости пикселя.

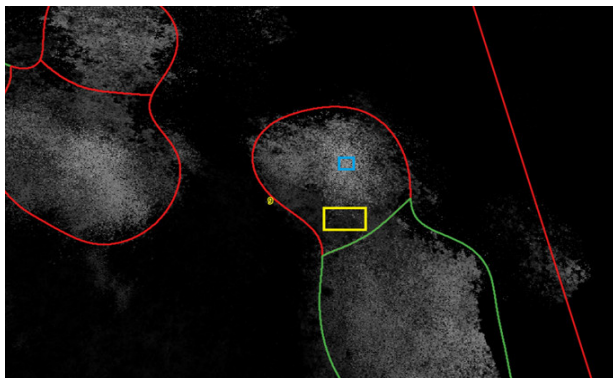


Рис. 9. Пример выбросов пикселей в пределах контура кроны дерева – желтый прямоугольник. Синий прямоугольник – значение яркости пикселя, принятое за высоту дерева, взято вручную

Fig. 9. An example of outliers in the distribution of pixel brightness within the crown outline of a tree (a yellow rectangle). The blue rectangle marks the area where the pixel brightness value, taken as the height of this tree, was manually taken

Этот способ дал возможность довольно точно определять высоты деревьев, но потребовал большого количества времени.

В итоге за высоту дерева принята величина, равная сумме среднего значения яркости пикселей и стандартного отклонения, умноженного на 2,5:

$$H = M + 2,5Sdev. \quad (2)$$

Так высота деревьев была определена достаточно точно, а временные затраты стали минимальными. Сравнение высот деревьев по натурным измерениям и высот, определенных по данным наземной лидарной съемки, представлено на рис. 10. Показаны ряды измерений, выполненных для березы на трех пробных площадках.

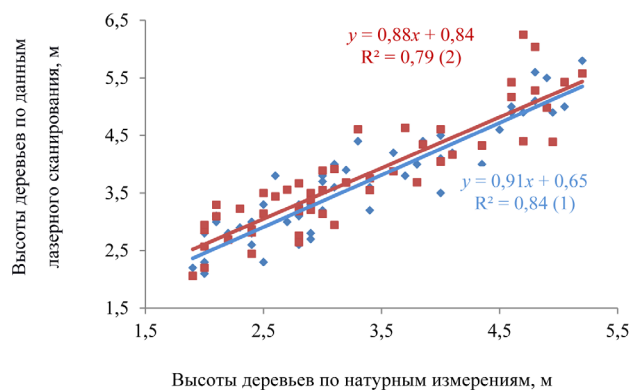


Рис. 10. Сравнение высот деревьев, полученных различными методами: H равно максимальным значениям яркости с ручной коррекцией (голубые отметки) и $M + 2,5Sdev$ (красные отметки)

Fig. 10. Comparison of tree heights obtained by different methods: height H equals maximum brightness values with manual correction (blue markers) and $M + 2.5Sdev$ (red markers)

На графиках видно, что показатели, найденные с помощью лазерной съемки, коррелируют с результатами натуральных измерений. По данным рисунка, измерения высот деревьев по максимальным значениям яркости пикселей с ручной корректировкой больше соответствуют результатам натуральных наблюдений ($R^2 = 0,844$) в сравнении с автоматизированным методом определения высот деревьев по сумме среднего значения и стандартного отклонения. Однако этот метод требует большого количества времени.

В результате установлено, что высоты, определенные автоматически по значениям статистик распределения яркостей пикселей по формуле (2), наиболее соответствуют высотам, найденным по максимальным значениям яркости пикселей с ручной корректировкой (рис. 10, 11). Это подтверждает пригодность метода для автоматизации измерений высот деревьев при помощи лидарной съемки. На рис. 11 видно, что средняя высота древостоев на изученном склоне снижается постепенно от 4,5–5,0 до 1,1–1,6 м (в среднем 0,26 м на 10 м высоты) с определенными флуктуациями (0,2–0,4 м) по мере увеличения высоты от 290 до 425 м над ур. м.

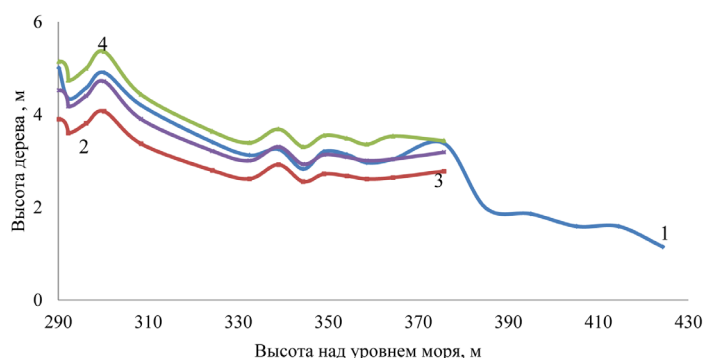


Рис. 11. Зависимость средних высот деревьев (их значения равны: 1 – максимальным значениям яркости с ручной корректировкой; 2 – $M + 2Sdev$; 3 – $M + 2,5Sdev$; 4 – $M + 3Sdev$), полученных лазерным сканированием, от высоты над уровнем моря

Fig. 11. Dependence of average tree heights (their values are equal to: 1 – maximum brightness values with manual correction; 2 – $M + 2Sdev$; 3 – $M + 2.5Sdev$; 4 – $M + 3Sdev$) obtained by laser scanning from the altitude above sea level

Анализ варьирования сомкнутости древостоев (суммы площадей проекций крон деревьев) по мере увеличения высоты над уровнем моря выявил, что этот показатель изменяется нелинейным образом (рис. 12). Так, в нижней части профиля (290...325 м над ур. м.) он сначала повышается от 4620–4890 до 5860 м²/га, а потом (350 м над ур. м.) резко снижается более чем в 2 раза – до 2570 м²/га. На 5 м выше по склону он опять увеличивается до 4870 м²/га и лишь в интервале 355...425 м над ур. м. уменьшается до 145 м²/га почти по экспоненте без резких колебаний. Такой характер изменения сомкнутости древостоев не соответствует выявленному нами постепенному снижению температуры воздуха – 0,5–0,7 °С на каждые 100 м высоты, – которую традиционно считают главным фактором, определяющим рост и выживание древесных растений [2].

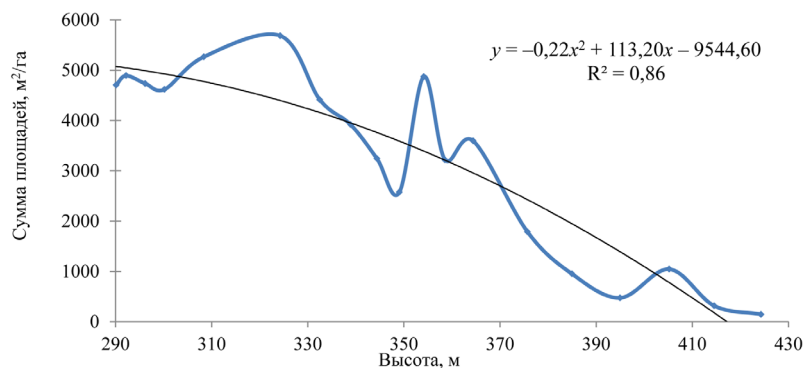


Рис. 12. Изменение с высотой над уровнем моря определенных по данным аэрофотосъемки сумм площадей проекций крон деревьев на юго-восточном склоне г. Китчепакхк

Fig. 12. Change with altitude above sea level of the sums of the areas of tree crown projections on the southeastern slope of Kitchepakhk Mountain determined by aerial survey data

Мы предполагаем, что это связано с резким ухудшением по мере увеличения высоты почвенных условий (снижение температуры почвы; уменьшение количества доступных минеральных веществ и др.) [11, 19] и условий выживания в зимний период для частей растений, находящихся выше снега (скорость ветра возрастает с высотой в 5–6 раз) [6], а также, в локальном плане, с сокращением вегетационного периода (на 4–7 дн.) из-за накопления больших масс снега (до 3–5 м) в нижней части ступеней горных террас, повсеместно встречающихся на склонах Хибинских гор [13].

Заключение

Данные мобильного наземного лазерного сканирования могут быть успешно использованы для картирования древостоев и определения их характеристик (высоты отдельных деревьев, площади проекций крон, средней суммы площадей проекций крон, средней высоты, количества деревьев) в условиях лесотундрового экотона горных территорий Кольского полуострова. Объединение материалов лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата и натурных измерений позволяет оперативно получать точные данные об основных параметрах большого количества деревьев, произрастающих на значительных площадях труднодоступных горных районов субарктики России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. 2019. № 4. С. 243–254.

Grigor'ev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., V'yukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. Structure and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau. *Ekologiya* [Russian Journal Ecology], 2019, no. 4, pp. 243–254. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0367059719040073>

2. Моисеев П.А., Галимова А.А., Бубнов М.О., Дэви Н.М., Фомин В.В. Динамика древостоев и их продуктивности на верхнем пределе произрастания в Хибинах на фоне современных изменений климата // Экология. 2019. № 5. С. 341–355.

Moiseev P.A., Galimova A.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Fomin V.V. Tree Stands and Their Productivity Dynamics at the Upper Growing Limit in Khibiny on the Background of Modern Climate Changes. *Ekologiya* [Russian Journal Ecology], 2019, no. 5, pp. 341–355. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0367059719050081>

3. *Agisoft PhotoScan User Manual*. Professional Edition, Version 0.9.0. Agisoft LLC, 2012. 49 p. Available at: http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_0_9_0_en.pdf (accessed 07.02.20).

4. Bonan G.B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 2008, vol. 320, iss. 5882, pp. 1444–1449. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1155121>

5. Brieger F., Herzsuh U., Pestyakova L.A., Bookhagen B., Zakharov E.S., Kruse S. Advances in the Derivation of Northeast Siberian Forest Metrics Using High-Resolution UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, iss. 12, art. 1447. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11121447>

6. Cairns D.M. Patterns of Winter Desiccation in Krummholz Forms of *Abies lasiocarpa* at Treeline Sites in Glacier National Park, Montana, USA. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2001, vol. 83, iss. 3, pp. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2001.00151.x>

7. Chen Q., Baldocchi D., Gong P., Kelly M. Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland Using Small Footprint Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, vol. 72, no. 8, pp. 923–932. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.72.8.923>

8. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localization and Mapping: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, vol. 13, iss. 2, pp. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022>

9. Hagedorn F., Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Bartysh A.A., Fomin V.V., Kapralov D.S., Terent'ev M., Bugman H., Rigling A., Moiseev P.A. Treeline Advances along the Urals Mountain Range – Driven by Improved Winter Conditions? *Global Change Biology*, 2014, vol. 20, iss. 11, pp. 3530–3543. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>

10. Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Duncan R.P. Are Treelines Advancing? A Global Meta-Analysis of Treeline Response to Climate Warming. *Ecology Letters*, 2009, vol. 12, iss. 10, pp. 1040–1049. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>

11. Kammer A., Hagedorn F., Shevchenko I., Leifeld J., Guggenberger G., Goryacheva T., Rigling A., Moiseev P. Treeline Shifts in the Ural Mountains Affect Soil Organic Matter Dynamics. *Global Change Biology*, 2009, vol. 15, iss. 6, pp. 1570–1583. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01856.x>

12. Kulha N., Pasanen L., Aakala T. How to Calibrate Historical Aerial Photographs: A Change Analysis of Naturally Dynamic Boreal Forest Landscapes. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 10, art. 631. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9100631>

13. Kullman L. Climate Change and Primary Birch Forest (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*) Succession in the Treeline Ecotone of the Swedish Scandes. *International Journal of Research in Geography*, 2016, vol. 2, iss. 2, pp. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.20431/2454-8685.0202004>

14. Liang X., Kukko A., Hyypä J., Lehtomäki M., Pyörälä J., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Wang Y. In-situ Measurements from Mobile Platforms: An Emerging Approach to Address the Old Challenges Associated with Forest Inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 143, pp. 97–107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.019>

15. Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests*, 2013, vol. 4, iss. 4, pp. 922–944. DOI: <https://doi.org/10.3390/f4040922>

16. Maguire A.J., Eitel J.U.H., Vierling L.A., Johnson D.M., Griffin K.L., Boelman N.T., Jensen J.E., Greaves H.E., Meddens A.J.H. Terrestrial Lidar Scanning Reveals Fine-Scale Linkages between Microstructure and Photosynthetic Functioning of Small-Stature Spruce Trees at the Forest-Tundra Ecotone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, vol. 269–270, pp. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.019>

17. Ranson K.J., Montesano P.M., Nelson R. Object-Based Mapping of the Circumpolar Taiga-Tundra Ecotone with MODIS Tree Cover. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, iss. 12, pp. 3670–3680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.006>

18. Shettigara V.K., Sumerling G.M. Height Determination of Extended Objects Using Shadows in SPOT Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, vol. 64, iss. 1, pp. 35–44.

19. Solly E.F., Djukic I., Moiseev P.A., Andreyashkina N.I., Devi N.M., Göransson H., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Trubina M.R., Schweingruber F.H., Wilmking M., Hagedorn F. Treeline Advances and Associated Shifts in the Ground Vegetation Alter Fine Root Dynamics and Mycelia Production in the South and Polar Urals. *Oecologia*, 2017, vol. 183, iss. 2, pp. 571–586. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3785-0>

20. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. ‘Structure-from-Motion’ Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology*, 2012, vol. 179, pp. 300–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

LASER SCANNING AND AERIAL PHOTOGRAPHY WITH UAV IN STUDYING THE STRUCTURE OF FOREST-TUNDRA STANDS IN THE Khibiny Mountains

Nail F. Nisametdinov, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [AAI-3961-2020](https://orcid.org/0000-0001-9410-6807), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9410-6807>

Pavel A. Moiseev, Doctor of Biology; ResearcherID: [M-9132-2013](https://orcid.org/0000-0003-4808-295X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-295X>

Ivan B. Vorobiev, Research Scientist; ResearcherID: [AAK-3957-2021](https://orcid.org/0000-0002-2563-585X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2563-585X>

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; e-mail: niznail@yandex.ru

Abstract. Studying the structure of stands is a key point in assessing the role of trees in carbon deposition. Information on the spatial structure of ground vegetation at the upper treeline is still insufficiently presented in modern studies. High resolution remote sensing can provide important data to understand the properties and dynamics of vegetation in these conditions. We test the applicability of ground-based mobile laser scanning of the terrain and aerial photography for the rapid and high-precision assessment of the characteristics of tree stands in the forest-tundra ecotone. We obtained canopy height models (CHMs) of the forest and supplemented them with aerial photographs of the research area on the southeastern slope of the Khibiny Mountains. Using CHMs we have delineated boundaries of tree crowns. The height and projection area were determined for each tree. The first characteristic obtained by

laser scanning was compared to the heights of the same trees estimated by field measurements. This was done for the purposes of verification. The comparison revealed that laser scanning data allow to set heights closest to field measurements in case the heights are determined by the maximum values of brightness of pixels of CHMs with manual correction of values when outliers are detected ($R^2 = 0.84$). Since manual correction of outliers is time-consuming, we proposed a way to automate the measurements by determining tree heights using the sum of the average value of pixel brightness and the standard deviation multiplied by 2.5 ($R^2 = 0.79$). We compared the area characteristics of the stands obtained by laser scanning and the unmanned aerial vehicle (UAV) photography. Thus, we obtained detailed information on the spatial location and size of 4424 trees in an area of about 10 ha and compared the results of measuring tree characteristics obtained by different methods. It was also found that with increasing height from 290 to 425 m above sea level on the studied slope, the average height of stands decreases gradually from 4.5–5.0 to 1.1–1.6 m with small fluctuations (0.2–0.4 m), while the density of stands changes from 4620–5860 to 145 m²/ha in a non-linear way.

For citation: Nisametdinow N.F., Moiseev P.A., Vorobiev I.B. Laser Scanning and Aerial Photography with UAV in Studying the Structure of Forest-Tundra Stands in the Khibiny Mountains. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

Funding: Data collection and analysis were funded by the Russian Science Foundation, grant No. 17-14-01112; preparation of the text and figures was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21-14-00137.

Keywords: laser scanning, aerial photography, digital elevation model, digital surface model, canopy height model, segmentation, upper treeline, Khibiny Mountains.

УДК 630*651.72

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-23-35

SEED QUALITY OF *Larix sibirica* Ledeb. DEPENDING ON THE DISTANCE BETWEEN FOREST AREAS AND POLLUTION SOURCES AROUND ULAANBAATAR CITY OF MONGOLIA**Bayarsaikhan Udval¹, Candidate of Biology;** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0021-9155>**Sukhbaatar Gerelbaatar², Candidate of Biology, Assoc. Prof.;**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9561-5256>**Tserenbaljir Dashzeveg¹, Candidate of Agriculture;**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7757-4879>**Anatoly I. Lobanov³, Candidate of Biology;** ResearcherID: [ABB-8764-2020](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212)ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>¹Division of Forest Resources and Protection, Mongolian Academy of Sciences, Baruun selbe 15-4, Chingeltei District, Ulaanbaatar, 15170, Mongolia; e-mail: udvalb@mas.ac.mn²National University of Mongolia, University str., 3, Sukhbaatar District, Ulaanbaatar, 14201, Mongolia; e-mail: gerelbaatar@seas.num.edu.mn³Scientific Research Institute of Agrarian Problems of Khakassia, P.O. Box 709, Abakan, Republic of Khakassia, 655019, Russian Federation; e-mail: anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

Abstract. Seed quality and seed germination are the major indicators determining the success of regeneration and structure in natural forest ecosystems. This study focuses on problems associated with seed quality and seed germination under air pollution impacts in the surrounding forest ecosystems of Ulaanbaatar city of Mongolia. The objectives were to test whether there was any negative effect of air pollutants on the site index, and to analyze the relationship between seed quality and distance from the city center (maximum pollution). The study was carried out in natural larch forests (*Larix sibirica* Ledeb.) growing in the vicinity of the capital of Mongolia. A total of eight 100×100 m (1 ha) sample plots were laid out using completely randomized sampling design along the main wind direction. Remoteness from the city center was 10, 15, 20 and 30 km both to the north and to the south. Results showed a high variation in stand mean height ($p > 0.001$) and diameter ($p > 0.001$) among selected forest areas. In general, all sampled forests belonged to bonitet / quality classes III, IV and V, which are considered as relatively poor growing conditions in terms of site index. Therefore, greater site index and seed quality were observed in the most distant locations from the city center, and contrary, the poorest seed quality was detected in locations close to the city center. This emphasizes that forests growing close to pollution sources exist with a potential risk of degradation, and their reproductive organs are more sensitive to the effects of pollutants.

For citation: Udval B., Gerelbaatar S., Dashzeveg Ts., Lobanov A.I. Seed Quality of *Larix sibirica* Ledeb. Depending on the Distance between Forest Areas and Pollution Sources around Ulaanbaatar City of Mongolia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 23–35. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-23-35

Acknowledgments: This research was carried out within the framework of the project “Study of Forest Ecosystems in the Green Zone of Ulaanbaatar City” and funded by the Foundation for Science and Technology. We also thank John Stanturf for the language improvement of this article.

Keywords: Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), seed quality, germination, site index, air pollution, Ulaanbaatar, Mongolia.

Introduction

Natural regeneration is an important element in ensuring the sustainability of the forest ecosystem [22]. Depending on the growing environment and other influencing factors, regeneration performance and reproductive capacity vary greatly in different regions of the world.

Among these factors, air pollution has a serious negative impact on the health and productivity [3, 9] of trees and their physiology [1]. Here, forests are subject to higher depositional loads than other ecosystems, depending on tree species and canopy structure. Dry deposition accumulated on the tree crown is washed off by precipitation and enhances the deposition in the forest soils [3, 7, 12, 13, 25]. Several studies have reported that the main air pollutants causing forest damage are O₃, SO₂, NO₂ and NH₃, as well as heavy metals, which show visible damage to leaves and needles in the forests [10, 17, 24], and Hg, Cd, and Pb are currently of the greatest toxicological concern. Therefore, FAO [20] reported that, the air pollution also causes water and nutrient imbalances and higher sensitivity to frost, droughts, insect pest attacks, and fungal diseases. However, the spread of air pollutants and their movement from the different sources of pollution are closely related to wind velocity and direction. Forest areas remote from the industries and big cities, raised concerns that forest decline might be caused by long-range atmospheric transport of pollutants [24, 25]. High concentration of pollutants derived from industrialized urban areas treat an adverse damaging effect to surrounding forest ecosystems, which resulted in forest decline [27] and decreased reproduction [9, 10]. Ulaanbaatar is the biggest city (capital city) of Mongolia, and become main social and economic center of the country. According to statistics, over 1.5 mln people live in Ulaanbaatar. Moreover, air pollution in Ulaanbaatar becomes one of the pressing issues, which treat a severe negative effect on public and environmental health [16, 18]. The high level of air pollution during the cold season (from November to April) is associated with the regular use of large quantities of charcoal for heating and electricity production at power plants and in the Ger district of Ulaanbaatar [28]. The forest growing around the capital city, called “Green Zone of Ulaanbaatar”, plays an important role in maintaining environmental sustainability for residents and is the southern continuation of the distribution of the Great Siberian boreal forests [14]. These forests are characterized by relatively high pollution exposure rate, and occupy a territory of 227,263 ha [26]. There are very few studies on the effects of pollutants derived from large settlements on surrounding forest ecosystems in Mongolia. The objectives of this study are: to evaluate the effect of air pollution on stand and site quality; and to detect a relationship between seed quality and remoteness from the pollution sources.

Materials and methods

Study area. The present study was carried out in natural larch forests growing around Ulaanbaatar city, which belong to the southwestern end of the Khentii Mountains [6, 23]. Ulaanbaatar city is characterized by accelerated population growth rate and industrialization, which has had a serious negative impact on the natural forest environment. The climate in the study area is cold semi-arid and harsh continental with a precipitation peak between June and August.

The dry season extends from March to June in spring and from September to October in autumn. The mean temperature is 1.4 °C and annual precipitation averages 269.2 mm (fig. 1). The soils in the area are mainly Umbrisols, Chernozems and Kastanozems [15].

Fig. 1. Climograph of the area around Ulaanbaatar, Mongolia (1988–2018)

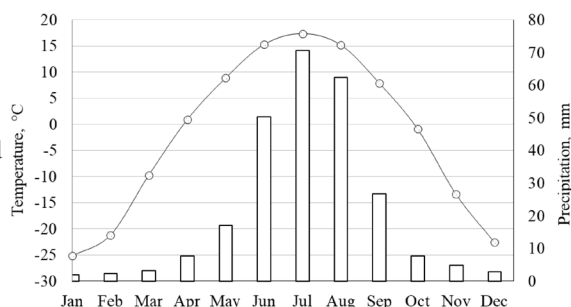
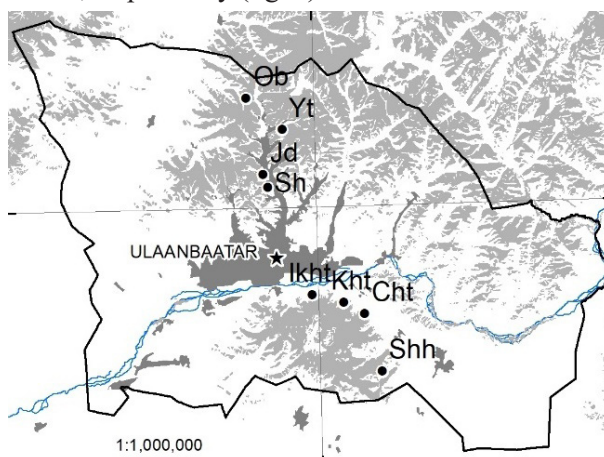


Fig. 1. Climograph of the area around Ulaanbaatar, Mongolia (1988–2018)

Sampling design. Long-term meteorological data showed that the main wind direction around Ulaanbaatar dominates from north-west to south-east. In order to detect an environmental impact of pollutants originated from settlement area on surrounding forest ecosystems, sampling plots were established along the main wind direction in different radiuses (10 to 30 km) from the city center. Rectangular 100×100 m sample plots were laid out in natural larch forests using completely randomized sampling design. A total of eight forest sites were sampled in 2014, namely Shadivlan (Sh), Yargait (Yt), Jigjid (Jd), Oin bulag (Ob), Ikh tenger (Ikht) in 10, 15, 20 and 30 km to the north, and Khureltogoot (Kht), Chuluut (Cht) and Shajin hurh (Shh) in 10, 15, 20 and 30 km to the south from the city center, respectively (fig. 2).

Fig. 2. Location of the sample plots



Measurements and data collection. Tree morphometric measurements in the sample plots were carried out according to Anuchin N.P. [2]. Here, tree height and stem diameter were measured using Haglöf Vertex IV Hypsometer and Digital Tree Caliper. The site index was used to determine the quality of the forest area. According to Orlov's classification, based on the average height and age of the stand, the tallest trees belonged to quality class I, and the smallest belonged to quality class V, respectively. Therefore, stand density was defined based on sum of stem basal area at the sample plots. The stand density was determined based on the sum of the tree stem basal area on the sample plots. However, the Kraft's growth rate, A.A. Korchagin's tree seed crop classifications [4], and tree selection criteria were used to assess the growth rate at the stand level, the crop of tree seeds and distribution of trees by the relative tree position (plus, normal and low quality trees) [5, 8, 11], respectively.

Seed collection was carried out from larch trees growing on the sample plots in September, 2015 and 2016 [14]. A total of 400 seed trees were subjected to seed collection on the inventoried sample plots. Therefore, the morphometric measurements (length and width) of sampled cones and seeds were measured using Mitutoyo Digital Vernier Caliper with an accuracy of 0.01 mm.

Laboratory tests of seed quality were performed in accordance with the International Rules for Seed Testing [21]. Here, the weight of 1000 seeds of larch, and their germination energy and germination capacity were examined. 100 seeds with four replications from each seed sources were subjected to germination test. Germination capacity is the proportion of total germinated seeds to that of sown seeds, which is expressed in percentage. Germination energy (also expressed in percentage), which is one of the commonly employed indices of germination speed [21] was computed as the proportion of total germinated seeds after 7 days to that of total germinated seeds after 15 days. Seed germination was tested under laboratory conditions in a Plant Growth Chamber at the temperature of 20 to 30 °C for 15 days. The differences in cone, seed and seed germination characteristics between different seed sources were determined by analysis of variance (ANOVA). Duncan's multiple range test (DMRT) was used for multiple comparisons.

Results and discussion

Comparison of stand characteristics and site index. The main stand characteristics of the sampled forests are shown in table 1. Overall, most of the stands belonged to pre-mature and mature classes in terms of forest age, and stand density was ranged from 0.6 (Shh) to 0.9 (Kht). Stand mean diameter ($p > 0.001$, $F = 3.06$) and height ($p > 0.001$, $F = 2.36$) were varied among selected stands, and the greatest values were recorded in Shh and Kht, and lowest in Yt and Cht, respectively (table 1). Therefore, growing stocks among sampled stands were averaged $233.9 \pm 25.3 \text{ m}^3/\text{ha}$. In terms of site quality, all sample plots belonged to III–V bonitet / quality classes of the sites, and the poorest site classes were recorded in Yt and Cht (table 1).

Table 1

Stand characteristics of the forests inventoried for this study

Site ID	Stand density	Stand age (yr)	Mean diameter (cm)	Mean height (m)	Bonitet / quality class of the site	Growing stock, m^3/ha	Geographical location		
							Lat. N	Long. E	Elevation, m
Sh	0.8	110	21.4	16.7	IV	215	107.05	47.50	1545
Yt	0.8	80	15.0	13.9	V	213	106.51	48.09	1498
Jd	0.8	90	20.3	19.0	III	276	107.59	47.52	1439
Ob	0.8	120	21.9	20.5	IV	254	107.03	47.51	1631
Ikht	0.7	80	16.9	14.9	IV	160	107.07	47.45	1648
Kht	0.9	120	25.4	20.0	IV	382	106.53	48.01	1532
Cht	0.7	110	17.1	15.0	V	164	106.55	48.06	1587
Shh	0.6	100	28.9	22.6	III	207	106.53	48.02	1494

According to Kraft's growth rate classification, the trees growing in each sampled stand were varied, and the dominant part belonged to I–III quality classes except for Ikht and Kht, and the remaining part to IV–V quality classes, respectively (fig. 3). The distribution graph of larch trees by growth rate classes showed a steadily increasing percentage of trees with slower growth rate in the selected areas with transition to the city center (fig. 3). This pattern was more pronounced in the southern closest forested areas, which are located along the main wind direction from sources of pollution (fig. 3b).

Contrary, in most of sampled forests in the north, the trees from I to III quality class were often higher, and a gradual increase of slower growing trees was also observed (fig. 3a). Generally, the highest proportion of faster growing larch trees occurred in the most remote areas in both directions. In addition, a detailed analysis of the trees using selection criteria showed a specific pattern of distribution, where dominance belonged to stands of normal and low quality (table 2).

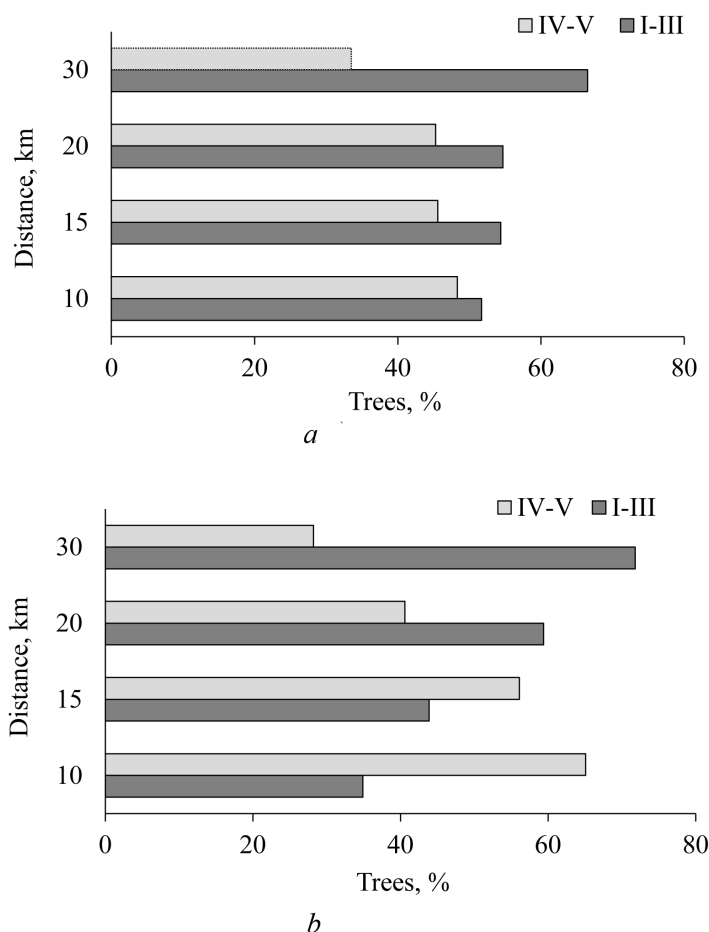


Fig. 3. Distribution of trees according to Kraft's growth rate classification on the northern (a) and southern (b) sample plots

Table 2

Distribution of the trees by selection criteria

Site ID	Remoteness from the city center, km	Relative distribution of the trees by selection criteria, %			Stand quality
		Plus tree	Normal tree	Low quality tree	
Sh	10	12.0	42.7	45.3	Low
Yt	15	13.1	38.3	48.6	Low
Jd	20	4.8	53.2	41.9	Normal
Ob	30	13.0	47.2	39.5	Normal
Ikht	10	6.6	37.1	56.1	Low
Kht	15	4.5	31.8	63.7	Low
Cht	20	3.3	69.5	27.2	Normal
Shh	30	10.8	45.9	43.2	Normal

The remaining part, which is only less than 8.5 ± 1.45 % belonged to plus tree position. In accordance with the selection criteria, all selected forests basically belonged to normal (45.7 ± 4.31 %) and low (45.8 ± 3.90 %) quality stands. Our results showed a critical high proportion of low quality trees in Ikht (56.1 %) and Kht (63.7 %), which are located in 10 and 15 km from the city center to the south (table 2). The existing difference in tree morphology and growth rate among selected areas may be caused by negative effects of air pollutants originated from the capital city. We found a stronger negative effect of air pollution in the southern points (within 20 km) via comparison of stand characteristics and site classes (table 1). According to Amarsaikhan et al. [16] in Ulaanbaatar city, the annual average concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 and NO_2 were 165.1, 75.1, 50.5 $\mu g/m^3$ and 85 $\mu g/m^3$, and critical concentrations were observed in winter season. Rather good site quality is observed considering the wind direction and sources of air pollution, in the forests growing to the north from Ulaanbaatar city. Our findings support the idea of other studies that the distribution of air pollutants in space is closely related to wind direction and velocity. In addition, the long-term meteorological data around Ulaanbaatar city showed that wind velocity and frequency peaked from March to May, which coincides with the driest period of the year.

Variation in morphological characteristics of cones and seeds. The results of the cone and seed morphological measurements are shown in table 3. Duncan's multiple range test revealed that there is a high variation of cone and seed morphometric dimensions not only between selected areas, but also within each plot. Here, cone length and width averaged 31.9 ± 2.2 mm and 21.9 ± 1.1 mm, and in comparison, Ob, Jd and Cht had relatively good morphological dimensions for cone, and Shh, Ob and Cht for seed (table 3).

Table 3

Cone and seed morphological characteristics of larch trees

Site ID	Length, mm			Width, mm		
	max	min	average	max	min	average
<i>Cone morphology (n = 400)</i>						
Sh	40.0	22.6	30.2cd	24.4	15.9	20.6de
Yt	41.6	23.3	29.4.de	28.7	17.3	21.6c
Jd	48.9	22.3	34.3ab	26.1	14.0	20.8d
Ob	44.9	26.0	35.3a	28.7	17.9	24a
Ikht	36.8	16.8	30.4c	32.4	11.1	22.2b
Kht	35.2	24.2	30.0d	26.6	17.7	21.5cd
Cht	41.9	25.5	32.5bc	29.5	17.5	22.7ab
Shh	39.0	26.2	32.9b	27.9	16.5	21.8bc
<i>Seed morphology (n = 400)</i>						
Sh	4.7	2.6	3.8e	3.9	1.9	2.8bc
Yt	5.4	3.7	4.6cd	3.4	2.4	3.0b
Jd	5.4	3.8	4.7bc	3.6	2.6	3.0b
Ob	5.9	4.1	4.9ab	4.8	2.6	3.2a
Ikht	5.2	2.1	4.0de	4.0	1.2	2.7c
Kht	5.6	3.8	4.5c	3.9	2.5	3.1ab
Cht	5.6	3.7	4.8b	3.8	2.4	3.0b
Shh	6.0	3.9	5.0a	3.9	2.1	3.2a

Note: Means with different letters are significantly different according to Duncan's multiple range test at 5 % level.

The lowest mean rates in cone and seed morphology were also found in the forests closer to the urban area. In our study, Ikht, Kht and Sh often showed lower values of site quality and regeneration capacity compared to other selected forest areas due to closer proximity to pollution sources.

The relationship between regeneration capacity and remoteness from the urban area. Depending on growing environment and geographical distribution, the weight of 1000 seeds, and their germination energy and capacity vary among different regions [1, 3, 19]. Two-year tests of seed germination energy and germination capacity have shown that the number of pollutants coming from the capital city causes a serious limiting effect on the reproductive capacity of the forest [10]. We found a high variation among these variables, and the poorest seed germination capacity was also observed in the areas closest to the city center, such as Sh (27.2 %), Ikht (28.1 %) and Kht (29.9 %), which were generally less than 30 % (fig. 4 a). Meanwhile, the germination energy level was less than in other areas ranging from 15 to 40 %. Contrary, rather good germination capacity was detected in seeds collected in more remote areas. Moreover, the relatively high means of seed weight and their morphological dimensions were observed in seeds collected in the most remote areas (Ob – 30 km to the north and Shh – 30 km to the south) (fig. 4).

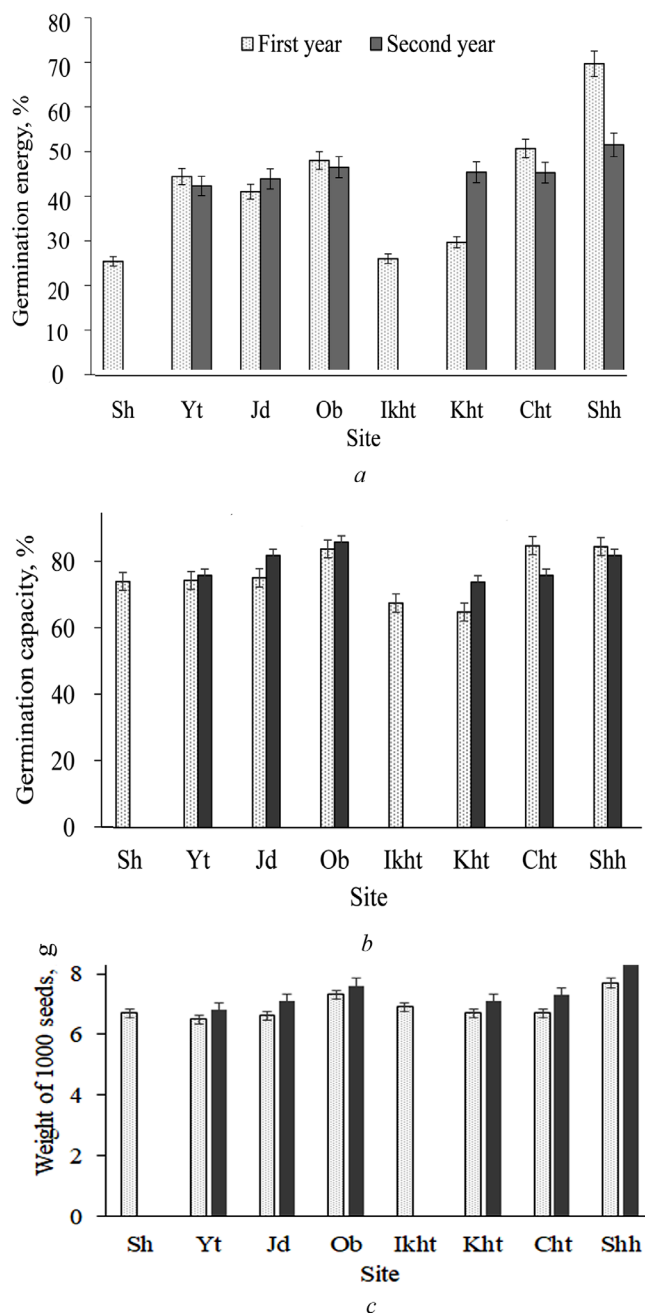


Fig. 4. Comparison of germination properties

In addition, we found an existing relationship between seed germination and distance from the source of pollution. In this case, seed germination ($r = 0.7819$) and energy ($r = 0.8929$) were strongly associated with an increase in distance from the source of pollution. This positive trend observed in seed quality showed that pollution sources have a negative impact not only on the quality of forest areas, but also on the ability to regenerate (fig. 5 a, 5 b).

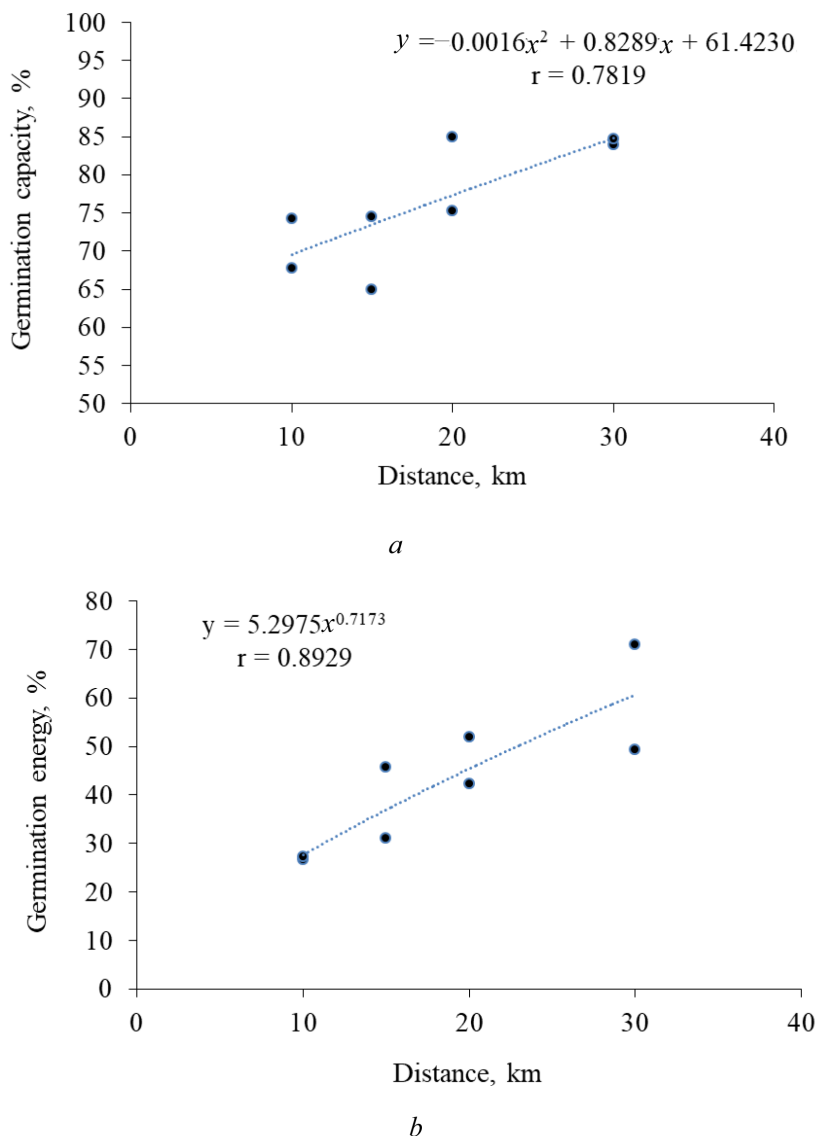


Fig. 5. Relationship between distance from the source of pollution and seed germination properties

Consequently, the quality and weight of 1000 seeds tended to improve with distance from the city center. The existing relatively poor site classes and seed quality in nearby forest areas of Ulaanbaatar city might be associated with high concentrations of gases and dust, accumulation of heavy metals and other chemicals in forest soils and on tree surfaces, which have a strong negative impact on tree physiology, stand reproduction and site quality.

Conclusion

In conclusion, a number of pollutants transferred to forest ecosystems by air movement and wind activity have a strong negative impact not only on the site quality, but also on the forest reproductive capacity by deteriorating the quality of seeds. Moreover, the main wind direction, and remoteness from the pollution sources

become a determining factor in the differentiation of the forest site quality and reproductive capacity in the surrounding forests of Ulaanbaatar city.

REFERENCES

1. Ангалт Е.М., Жамурина Н.А. Биологический анализ хвои, шишек и семян сосны обыкновенной в условиях городской среды // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2014. № 3(47). С. 156–158.
Angalt Ye.M., Zhamurina N.A. Biological Analysis of Scotch Pine Needles, Cones and Seeds in the Conditions of Urban Environment. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestia Orenburg State Agrarian University], 2014, no. 3(47), pp. 156–158.
2. Анучин Н.П. Лесная таксация. 6-е изд. М.: ВНИИЛМ, 2004. 552 с.
Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 552 p.
3. Валетова Е.А. Влияние техногенного загрязнения на репродуктивную способность сосны обыкновенной: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Барнаул, 2009. 19 с.
Valetova E.A. *Impact of Technogenic Pollution on the Reproductive Capacity of Scots Pine*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Barnaul, 2009. 19 p.
4. Волкович А.П. Лесное семеноводство. Минск: БГТУ, 2014. 107 с.
Volkovich A.P. *Forest Seed Production*. Minsk, BSTU Publ., 2014. 107 p.
5. Гиргидов Д.Я. Семеноводство сосны на селекционной основе. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 64 с.
Girgidov D.Ya. *Pine Seed Production on a Selection Basis*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 64 p.
6. Коротков И.А. Типы леса Монгольской Народной Республики // Леса Монгольской Народной Республики (география и типология). М.: Наука, 1978. С. 47–121.
Korotkov I.A. *Forest Types of the People's Republic of Mongolia: Geography and Typology*. Moscow, Nauka Publ., 1978, pp. 47–121.
7. Коршиков И.И., Лантева Е.В., Белоножко Ю.А. Качество пыльцы сосны обыкновенной и цитогенетические изменения у ее семенного потомства как показатели влияния техногенно загрязненной среды Криворожья // Сиб. экол. журн. 2015. № 2. С. 310–317.
Korshikov I.I., Lapteva E.V., Belonozhko Yu.A. Pollen Quality and Cytogenetic Changes of Scots Pine as Indicators of the Effect of Technogenic Environmental Pollution of Krivoy Rog. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2015, no. 2, pp. 310–317. DOI: <https://doi.org/10.15372/sej20150215>
8. Любавская А.Я. Лесная селекция и генетика. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 285 с.
Lyubavskaya A.Ya. *Forest Selection and Genetics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 285 p.
9. Носкова Н.Е., Третьякова И.Н. Влияние стресса на репродуктивные способности сосны обыкновенной // Хвойные бореальной зоны. 2006. № 3. С. 54–63.
Noskova N.E., Tretyakova I.N. Effect of Stress on Archangel Fir Reproduction Performances. *Хвойные бореальной зоны* [Conifers of the boreal zone], 2006, no. 3, pp. 54–63.
10. Осколков В.А., Воронин В.И. Репродуктивный процесс сосны обыкновенной в Верхнем Приангарье при техногенном загрязнении. Иркутск: Иркутск. гос. ун-т, 2003. 140 с.
Oskolkov V.A., Voronin V.I. *Reproductive Process of Scots Pine in the Upper Angara Region under Technogenic Pollution*. Irkutsk, ISU Publ., 2003. 140 p.
11. Тараканов В.В., Демиденко В.П., Ишутин Я.Н., Бушков Н.Т. Селекционное семеноводство сосны обыкновенной в Сибири. Новосибирск: Наука, 2001. 230 с.

Tarakanov V.V., Demidenko V.P., Ishutin Ya.N., Bushkov N.T. *Selective Seed Production of Scots Pine in Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001. 230 p.

12. Тарханов С.Н., Бирюков С.Ю. Определение влияния атмосферного загрязнения на морфометрические показатели и состояние ассимиляционного аппарата сосны и ели в бассейне Северной Двины // Сиб. экол. журн. 2012. Т. 19, № 3. С. 407–414.

Tarkhanov S.N., Biryukov S.Yu. Influence of Atmospheric Pollution on the Morphological Parameters of the Assimilation Apparatus of Pine and Spruce in the Basin of the Northern Dvina. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2012, vol. 19, no. 3, pp. 407–414. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425512030158>

13. Халикова О.В., Исянюлова Р.Р. Влияние рекреации на состояние почвенного покрова Черноморского побережья России // Лесн. вестн. 2019. № 23(6). С. 51–59.

Khalikova O.V., Isyanulova R.R. Effect of Recreation on Soil Cover at the Black Sea Coast in Russia. *Lesnoy Vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 6, pp. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-6-51-59>

14. *A Study Report on the Green Zone Forest*. Ulaanbaatar, Institute of Geography and Geocology, 2016. 136 p.

15. *A Survey Report on Soil in Ulaanbaatar City*. Ulaanbaatar, Institute of Geography, 2014. 120 p.

16. Amarsaikhan D., Battsengel V., Nergui B., Ganzorig M., Bolor G. A Study on Air Pollution in Ulaanbaatar City, Mongolia. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2014, vol. 2, pp. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2014.22017>

17. Barwise Y., Kumar P. Designing Vegetation Barriers for Urban Air Pollution Abatement: A Practical Review for Appropriate Plant Species Selection. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2020, vol. 3, art. 12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0115-3>

18. Batkhishig O., Ouynbat P., Bolormaa Ts., Zoljargal Kh., Ikhbayar D., Elbegzaya G., Ganzorig U., Baymbaa G., Enkhbayar B., Zolzaya M. *Soil Pollution in Ulaanbaatar City*. 2018, pp. 133–135.

19. Batkhuu N.-O., Udval B., Jigjid B.-E., Jamyansuren S., Fischer M. Seed and Cone Morphological Variation and Seed Germination Characteristics of Scots Pine Populations (*Pinus sylvestris* L.) in Mongolia. *Mongolian Journal of Biological Sciences*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 41–54. DOI: <https://doi.org/10.22353/mjbs.2020.18.14>

20. *FAO. Forests and Sustainable Cities: Inspiring Stories from Around the World*. FAO, 2018. 87 p. Available at: <http://www.fao.org/3/I8838EN/i8838en.pdf> (accessed 04.02.20).

21. International Seed Testing Association (ISTA). International Rules for Seed Testing. Rules 1999. *Seed Science and Technology*, 1999, Suppl. 333 p.

22. Juříčka D., Kusbach A., Pařílková J., Houška J., Ambrožová P., Pecina V., Rosická Z., Brtnický M., Kynický J. Evaluation of Natural Forest Regeneration as a Part of Land Restoration in the Khentii Massif, Mongolia. *Journal of Forestry Research*, 2020, vol. 31, iss. 5, pp. 1773–1786. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00962-5>

23. *Mongolian Multipurpose National Forest Inventory 2014–2017*. Ulaanbaatar, Ministry of Environment and Tourism, 2019. 145 p.

24. Paoletti E., Bytnerowicz A., Andersen C., Augustaitis A., Ferretti M., Grulke N., Günthardt-Goerg M.S., Innes J., Johnson D., Karnosky D., Luangjame J., Matyssek R., McNulty S., Müller-Starck G., Musselman R., Percy K. Impacts of Air Pollution and Climate Change on Forest Ecosystems – Emerging Research Needs. *The Scientific World Journal*, 2007, vol. 7, no. 1, art. 783864. DOI: <https://doi.org/10.1100/tsw.2007.52>

25. Prinz B. Effects of Air Pollution on Forests Prepared Discussion. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1985, vol. 35, iss. 9, pp. 913–924. DOI: <https://doi.org/10.1080/00022470.1985.10465970>

26. *Report on the State of the Environment of Mongolia 2015–2016*. Ulaanbaatar, Ministry of Environment and Tourism, 2017. 264 p.

27. Sase H., Bulgan T., Batchuluun T., Shimizu H., Totsuka T. Tree Decline and Its Possible Causes around Mt. Bogdkhan in Mongolia. *Phyton (Horn, Austria)*, 2005, vol. 45, no. 4, pp. 583–590.

28. Sonomdagva Ch., Byambatseren Ch., Batdelger B. Assessment of Air Pollution of Settlement Areas in Ulaanbaatar City, Mongolia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 67, art. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/67/1/012029>

ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ ОТ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДО ЛЕСОНАСАЖДЕНИЙ НА КАЧЕСТВО СЕМЯН *Larix sibirica* Ledeb. В ОКРЕСТНЫХ ЛЕСАХ ГОРОДА УЛАН-БАТОРА (МОНГОЛИЯ)

Б. Удвал¹, канд. биол. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0021-9155>

С. Гэрэлбаатар², канд. биол. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9561-5256>

Ц. Даишээвэг¹, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7757-4879>

А.И. Лобанов³, канд. биол. наук; ResearcherID: [ABB-8764-2020](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>

¹Отделение лесных ресурсов и охраны природы, Академия наук Монголии, ул. Баруун сельбе, д. 15-4, р-н Чингэлтэй, г. Улан-Батор, Монголия, 15170; e-mail: udvalb@mas.ac.mn

²Монгольский государственный университет, ул. Университетская, д. 3, р-н Сухэ-Батор, г. Улан-Батор, Монголия, 14201; e-mail: gerelbaatar@seas.num.edu.mn

³Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии, а/я 709, г. Абакан, Республика Хакасия, Россия, 655019; e-mail: anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

Аннотация. Качество семян и их всхожесть являются главными показателями, определяющими успех восстановления и структуру естественных лесных экосистем. Основное внимание уделено проблемам, связанным с качеством семян лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и ее прорастанием в условиях загрязнения воздуха в окружающих лесных экосистемах города Улан-Батора. Цель работы – выявление влияния загрязнения воздуха на индекс участка и анализ взаимосвязи качества семян и расстояния от лесного участка до центра города (максимума загрязнения). Исследования проведены в естественных лиственничниках, произрастающих в окрестностях столицы Монголии. Всего было заложено восемь пробных площадей размером 100×100 м с использованием полностью рандомизированного плана отбора проб вдоль основного направления ветра. Удаленность от центра города составляла 10, 15, 20 и 30 км как на север, так и на юг. Обнаружены значительные различия средней высоты древостоев ($p > 0,001$) и диаметра на высоте 1,3 м ($p > 0,001$). В целом все изученные лесонасаждения относились к III, IV и V классам бонитета, т. е. характеризовались относительно плохим состоянием с точки зрения индекса участка. Более высокие индекс участка и качество семян у *Larix sibirica* Ledeb. наблюдались в наиболее удаленных от центра города местах, и, наоборот, самые низкие по качеству семена были найдены недалеко от центра. Это позволяет утверждать: леса, произрастающие близко к источникам загрязнения, имеют потенциальный риск деградации, а их репродуктивные органы чувствительнее к воздействию вредных веществ, чем у деревьев, расположенных в экологически более благоприятных районах.

Для цитирования: Udval B., Gerelbaatar S., Dashzeveg Ts., Lobanov A.I. Seed Quality of *Larix sibirica* Ledeb. Depending on the Distance between Forest Areas and Pollution Sources around Ulaanbaatar City of Mongolia // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 23–35. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-23-35

Благодарность: Данное исследование было проведено в рамках проекта «Изучение лесных экосистем в зеленой зоне города Улан-Батор» при финансовой поддержке Фонда «Наука и Технологии». Мы также благодарим Джона Стэнтурфа за помощь в подготовке статьи.

Ключевые слова: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), качество семян, всхожесть, индекс участка, загрязнение воздуха, Улан-Батор, Монголия.

УДК 630*2+582.475.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-36-54

ПРЕДСТАВИТЕЛИ СЕМЕЙСТВА СОСНОВЫЕ (*Pinaceae* Lindl.) СЕВЕРОАМЕРИКАНСКОЙ ФЛОРЫ В КОЛЛЕКЦИИ ДЕНДРОЛОГИЧЕСКОГО САДА ФБУ «СЕВНИИЛХ»

Н.А. Демидова, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [T-1151-2019](https://orcid.org/0000-0003-2673-2309),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2673-2309>

Т.М. Дуркина, науч. сотр.; ResearcherID: [ABE-1634-2020](https://orcid.org/0000-0001-7389-1404),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7389-1404>

Л.Г. Гоголева, науч. сотр.; ResearcherID: [ABE-1664-2020](https://orcid.org/0000-0002-4876-892X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4876-892X>

Н.Н. Васильева, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABE-1644-2020](https://orcid.org/0000-0002-7245-8120),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7245-8120>

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: forestry@sevniilh-arh.ru

Аннотация. Приведены результаты интродукции древесных видов североамериканской флоры семейства сосновые (*Pinaceae* Lindl.) в условиях Европейского Севера России. Цель исследований – выделение из древесных видов коллекции наиболее ценных экземпляров для внедрения в северные условия. Использовали экспериментальный, расчетный, аналитический и сравнительный методы. Заключение о результате интродукции конкретного растения делали на основе материалов многолетних фенологических наблюдений, которые выполняли по методике ботанических садов, усовершенствованной для условий Европейского Севера России. В регионе впервые проведено широко-масштабное испытание инорайонных хвойных пород, создана коллекция, включающая 2 вида пихты, 4 вида и 3 формы ели, 2 вида сосны и 1 вид дугласии. Максимальное внимание было уделено интродукции видов рода сосна. Положительные результаты выращивания в дендрологическом саду *Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S.Wats. позволили выделить ее для дальнейшего интродукционного испытания на опытных плантационных посадках региона. Из использованных образцов семян, большей частью из северных районов природного ареала этой сосны, выращено 104,2 тыс. семян, которые были высажены на плантациях, расположенных в Архангельской, Вологодской областях и Республике Коми. К сожалению, не весь разводочный материал для испытываемых североамериканских видов сосны получен из мест естественного произрастания, что ставит под сомнение некоторые неудовлетворительные результаты. Поэтому, например, для сосны Банкса и сосны веймутовой целесообразно привлечение для опытов дополнительных образцов из наиболее северных районов их природных ареалов в Канаде. Многие из этих видов представляют как научный, так и практический интерес. Для оценки хозяйственной ценности тех интродуцентов, адаптационные возможности которых в условиях Европейского Севера по результатам исследований не вызывают сомнений, целесообразна закладка в регионе опытно-производственных культур, аналогичных уже созданным посадкам североамериканской сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats.). Концентрация в 2–3 лесничествах нашего региона таких опытно-производственных культур из пихты бальзамической (*Abies balsamea* Mill.), Фразера (*A. fraseri* (Pursch.) Poir.), лиственницы американской (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch.), ели канадской (*Picea glauca* Voss.), Энгельмана (*P. engelmannii* Engelm.), черной (*P. mariana* Britt.), сосны Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.), скрученной широкохвойной (*P. contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats.), а также дугласии (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) с привлечением для каждого вида нескольких происхождений семян из

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there is no conflict of interest

наиболее северных районов его природного ареала позволит создать ценнейший интродукционный объект, научное и практическое значение которого будет трудно переоценить.

Для цитирования: Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Васильева Н.Н. Представители семейства сосновые (*Pinaceae* Lindl.) североамериканской флоры в коллекции дендрологического сада ФБУ «СевНИИЛХ» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 36–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-36-54

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Рослесхоза, регистрационный № НИОКТР 115042310018.

Ключевые слова: сосновые, интродукция, североамериканская флора, Европейский Север России, зимостойкость, пихта, сосна, ель, дугласия, сосна скрученная.

Введение

При интродукции древесных видов для лесохозяйственных целей необходимо учитывать экологические факторы, предыдущий опыт культивирования, степень освоенности породы промышленностью и спрос на древесину. Интродуцируемые виды могут превосходить местные по скорости роста и накоплению биомассы. В повышении общей продуктивности лесов большое значение имеет замена недостаточно быстрорастущих местных пород их формами или видами из других регионов. Инорайонные виды должны превосходить аборигенные по скорости роста (на 10–15 %), а также по общей производительности.

В растительном мире трудно найти семейство, которое можно было бы сопоставить с сосновыми по накапливаемой биомассе и площади освоенной территории (даже среди цветковых). В своем природном распространении оно насчитывает 9 (10) родов и не менее 250 видов, почти полностью ограничено северным полушарием, причем некоторые его виды встречаются на крайнем пределе ареала древесной растительности.

Экосистемное разнообразие Северной Америки намного богаче европейского. Она занимает одно из ведущих мест среди флористических областей умеренных широт северного полушария, являясь крупнейшим очагом интродукции в другие климатические зоны, особенно велико здесь видовое разнообразие *Pinaceae* Lindl. Наравне с Юго-Восточной Азией Северная Америка послужила основным поставщиком интродукционного материала для создания богатейших коллекций сосновых во многих странах Европы, преимущественно ботаническими садами, реже лесными ведомствами. В ряде стран в рамках Международного союза лесных исследовательских организаций проводились серьезные работы с использованием при интродукции многих географических экотипов разных видов, что позволило получить надежные результаты по испытанию целого ряда ценных лесопромышленных пород (дугласия, ель ситхинская, сосна скрученная и др.) [21].

Многие североамериканские древесные виды растут на всех континентах, в том числе и в России. Широкая интродукция в европейскую часть нашей страны древесных пород из Северной Америки началась со второй половины XIX в. В настоящее время здесь можно встретить старые деревья разных видов сосен североамериканской флоры, лжетсуги, секвойи вечнозеленой, секвойя-дендрона гигантского и других, достигших больших размеров, а также многочисленные посадки основных лесобразующих пород Америки [9].

Значительный практический интерес для Северной Европы в настоящее время представляет интродукция сосны скрученной, демонстрирующей более быстрый рост по сравнению с сосной обыкновенной [20, 22–25].

В нашей стране опубликовано большое количество работ об адаптации сосны скрученной. Обнадеживающие результаты ее культивирования получены в республиках Карелии [15] и Коми [17], в Архангельской области [8]. Авторы отмечают достаточно высокую устойчивость данного вида и его превосходство в росте по сравнению с сосной обыкновенной в условиях интродукции.

С 1979 г. в различных регионах Европейского Севера России (Архангельская и Вологодская области, Республика Коми) сотрудниками Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства были созданы экспериментальные плантации сосны скрученной общей площадью 52 га.

Интродукции видов древесных растений североамериканской флоры с давних пор уделялось большое внимание не только в условиях Европейского Севера, но и в Ленинградской, Новгородской областях. Исследования хода роста и репродуктивных свойств потомства сосны скрученной различного географического происхождения в условиях Ленинградской области позволили сделать выводы о способности этого вида успешно плодоносить и образовывать всхожие семена. Выявлено, что наилучшим темпом роста в высоту характеризуются потомства северного происхождения, по диаметру – более южного [2].

На территории Новгородской области встречаются хвойные породы-интродуценты североамериканского происхождения, такие как сосна Банка, сосна скрученная, сосна веймутова, сосна румелийская, сосна желтая, сосна смолистая, сосна жесткая, сосна черная, сосна горная, ель колючая, ель Шренка, ель черная, ель Энгельмана, псевдотсуга Мензиса [1].

Исследования в условиях Карелии (средняя тайга), основанные на многочисленных наблюдениях с использованием математических методов, позволили получить представление о закономерностях роста и развития аборигенных и интродуцированных видов семейства *Pinaceae* Lindl., а также установить зависимость этих процессов от главнейших экологических факторов. Быстрее всего рост побегов и хвои начинается, достигает максимальных значений и заканчивается, как правило, у местных видов и культиваров из районов со сравнительно суровыми условиями среды. К очень перспективным для выращивания в средней тайге относятся изученные виды североамериканского происхождения: *Picea glauca* (ель сизая, или канадская) и *P. pungens* (ель колючая), *Abies balsamea* (пихта бальзамическая); к довольно перспективным – *A. concolor* (пихта одноцветковая), *Pinus strobus* (сосна веймутова). Наиболее перспективными видами для размножения семенами являются *Picea glauca*, *P. pungens* f. *glauca* (ель колючая ф. голубая), *Abies balsamea* [10].

Хвойные интродуценты североамериканского происхождения широко используются для озеленения. Так, например, в Санкт-Петербурге в начале XXI в. таксономический состав культивируемых хвойных включал 65 видов и форм, в т. ч. 23 таксона североамериканского происхождения [18].

Одной из перспективных пород Северной Америки считается псевдотсуга Мензиса (дугласия), однако примеров ее успешной интродукции на Северо-Запад России нет. По сообщению Н.Ю. Гусевой, плодоносящие деревья дугласии растут на Карельском перешейке, достигая в 20-летнем возрасте высоты 6 м

и диаметра 14,5 см; в суровые зимы они страдают от заморозков и развиваются медленно [5].

Интродукция на Европейский Север России видов семейства сосновые заслуживает особого внимания, поскольку многие из них имеют лесопромышленное значение и в случае положительных результатов испытания в местных условиях могут быть рекомендованы для ускоренного выращивания древесины. Поэтому интродукции видов семейства сосновые в дендрологическом саду им. В.Н. Нилова уделяется максимальное внимание. Данная коллекция представляет огромный интерес при оценке перспективности тех или иных видов как в районе исследования, так и для дальнейшего использования при создании хозяйственно-ценных и рекреационных насаждений [6].

Целью интродукционных исследований видов семейства сосновые североамериканской флоры является выделение и изучение наиболее ценных форм для внедрения в производство в северных условиях России.

Актуальность исследований обусловлена практической востребованностью древесных видов семейства сосновые североамериканской флоры для хозяйственного использования на Европейском Севере России: они представляют собой резерв генетического материала природной флоры и служат источником селекционного материала (как семенного, так и вегетативного).

Новизна исследований состоит в том, что впервые в регионе проведено широкомасштабное испытание инорайонных представителей семейства сосновые североамериканской флоры.

Объекты и методы исследования

Исследования проводятся на территории дендрологического сада им. В.Н. Нилова Федерального бюджетного учреждения «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства». Объект был создан для изучения интродукции древесных растений на Европейский Север России и вовлечения их в хозяйственное использование. Дендросад расположен вблизи г. Архангельска (64°29'45" с. ш., 40°46'41" в. д.), в северной подзоне тайги. Климат района исследований морской, субарктический, средняя температура воздуха – +0,8 °С. Средняя температура января – –12,5 °С, июля – +15,6 °С. Средний абсолютный годовой минимум – –34 °С. Абсолютный минимум – –49 °С, абсолютный максимум – +34 °С. Среднее количество осадков по многолетним данным составляет 675 мм в год (в летние месяцы 203 мм) [14]. Средняя продолжительность вегетационного периода 137 дней. Поздневесенние заморозки, которые нередко отмечаются после начала вегетационного периода, частое чередование оттепелей и похолодания в зимний период, а также высокий снежный покров в это время практически не позволяют интродуцировать многие теплолюбивые виды. Пониженный температурный режим и недостаточная, а порой избыточная влагообеспеченность в летний период способствуют замедлению темпов роста и развития некоторых растений-интродуцентов.

Посадки североамериканских видов проведены как в географическом, так и систематическом отделах коллекции дендрария. Участок первого из них характеризуется очень своеобразными рельефом, почвенными и микроклиматическими условиями: большую его часть занимала территория выработанного песчаного карьера. Ее периферийная часть представляла собой остатки песчаной морены

гряды, центральная – песчано-гравелистую подошву с выходом в отдельных местах, пятнами, «зеркалами» грунтовых вод, питаемых подступающим к участку заболоченным сфагновым сосняком. Перепад высот составлял около 15 м. Значительная часть территории географического отдела не имела почвенного слоя, поэтому на нее завезено примерно 1000 м³ еловой коры, которая после компостирования с куриным пометом была распланирована на обнаженном гравийно-песчаном основании и зафрезерована. Некоторое повышение уровня этого основания достигнуто за счет выемки грунта при рытье искусственных водоемов на участках, предназначенных для посадки видов маньчжурской и североамериканской флоры. Территория дендрария характеризовалась широким спектром экологических условий, что позволяло достаточно объективно оценивать адаптационные возможности интродуцируемых растений.

В дендрологическом саду им. В.Н. Нилова с 1961 г. по настоящее время было высажено 549 образцов разводочного материала: 81 вид и 6 родов семейства *Pinaceae* Lindl. – при этом основной объем работ приходился на 1971–1980 гг. Только для сосны бóльшая часть разводочного материала поступила в 1990-х гг., что связано с проведением в это время работ по закладке в регионе опытно-производственных культур сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia*) с использованием семян из различных районов ее природного ареала и других пунктов интродукции данного вида в Европе.

В настоящее время семейство сосновые представлено 10 видами пихты, 10 – лиственницы, 14 – ели, 12 – сосны и 1 – дугласии.

Методы исследования: экспериментальный, расчетный, аналитический, сравнительный. На практике заключение о результате интродукции в дендрологическом саду конкретного растения делается на основе материалов многолетних фенологических наблюдений, которые проводятся по методике ботанических садов [13], усовершенствованной для условий Европейского Севера России. Для изучения зимостойкости древесных интродуцентов как важнейшего показателя их устойчивости на Севере применяется характеристика результатов перезимовки и сопоставление их с погодой предшествующего вегетационного периода и условиями зимовки. Оценка зимостойкости интродуцированных растений производится по 7-бальной шкале [11]. К причинам повреждений относятся: низкие зимние температуры; их перепады, чередующиеся с продолжительными оттепелями, провоцирующими выход из глубокого покоя; возвраты холодов весной, т. е. поздние весенние заморозки, повреждающие раскрывшиеся почки или даже образовавшиеся молодые побеги; неблагоприятные погодные условия осенью, а именно ранние низкие температуры, не способствующие закалке растений и одревеснению побегов; слишком теплая и влажная осень, обуславливающая продолжительный рост деревьев, что также мешает своевременному одревеснению побегов; затяжные зимние холода, сопровождающиеся отдельными случаями резкого падения суточной температуры [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим более подробно результаты интродукции видов семейства *Pinaceae* Lindl. североамериканской флоры в дендрологическом саду им. В.Н. Нилова по родам.

Род *Abies* Mill. – пихта. Из имеющихся в коллекции дендросада 10 видов пихты 3 принадлежат к североамериканской флоре: *Abies concolor* (Gord.) Hoopes. (пихта одноцветная), *A. balsamea* Mill. (пихта бальзамическая), *A. fraseri* (Pursh.) Poir. (пихта Фразера). Наибольший интерес представляет пихта бальзамическая со средним приростом в высоту в возрасте 28 лет до 26 см в год, которая достигла возраста семеношения на 21-й год.

A. balsamea Mill. – пихта бальзамическая, естественно произрастает в Северной Америке (от Канады до штата Вирджиния, США). Это дерево высотой до 15–20 (27) м. В коллекции дендросада представлено двумя образцами из саженцев, полученных из Латвии (1969 г.), и семян из США (1993 г.). Общее количество – 20 деревьев. Латвийский образец цветет и плодоносит с 21 года. Средняя высота в возрасте 51 года составляет $15,7 \pm 1,2$ м, средний диаметр – $16,7 \pm 3,0$ см. Зимостойкость – I (табл. 1). Высота американского образца в зависимости от условий произрастания в возрасте 27 лет варьирует от 4 до 18 м, диаметр на высоте 1,3 м – 4...14 см.

A. fraseri (Pursh.) Poir. – пихта Фразера, произрастает на востоке Северной Америки. В дендросаду представлена двумя образцами (2 экз.), выращенными из семян, полученных из Липецкой области (1978 и 1981 гг.). В возрасте 39–42 лет максимальная высота – 2,5 м. Зимостойкость – I–II.

Для получения достоверных результатов интродукционного испытания на Европейском Севере России североамериканских видов пихты: аризонской, бальзамической, Фразера – также целесообразно привлечение достаточно крупных (не менее чем по 5 г) образцов семян из разных районов северной части природных ареалов растений.

Род *Picea* A. Dietr. – ель. К интродукции привлекалось 110 образцов (20 видов) ели, из 84 были выращены 18 таксонов для дальнейшего испытания. В настоящее время в коллекции имеется 6 таксонов ели североамериканской флоры – 17 образцов в количестве 103 деревьев (табл. 2).

P. engelmannii Engelm. – ель Энгельмана. В естественных условиях достигает высоты 30–50 м. В коллекции представлена одним образцом (5 экз.), выращенным из семян, полученных из Литвы (1972 г.). Цветет и плодоносит с 20 лет. На 48-й год средняя высота составляет $12,8 \pm 1,9$ м, средний диаметр – $16,4 \pm 1,7$. Зимостойкость – II. Сохранность – 100 %.

P. glauca Voss. – ель сизая, или канадская, произрастает на востоке Северной Америки. Дерево высотой 20–35 м. В дендросаду представлена четырьмя образцами, выращенными из семян, привезенных из Латвии (1968 г.), Липецка, Литвы (1979 г.) и Канады (1993 г.). Самый старый образец – латвийский (1968 г.) – цветет с 9 лет, плодоносит с 17, средняя высота в 52 года составляет $12,8 \pm 1,9$ м, средний диаметр – $11,0 \pm 2,4$ см; канадский и литовский цветут и плодоносят с 11–27 лет. Образец из Канады в возрасте 27 лет в зависимости от условий произрастания имеет высоту 2...14 м, диаметр – 2...16 см и отличается наибольшей сохранностью – 83,3 %. Зимостойкость – I.

P. mariana Britt. – ель черная. На территории естественного ареала характеризуется высотой 20–30 м. В коллекции представлена двумя образцами. Местопроисхождение семян – Эстония (1979 г.) и Канада (1993 г.). В 41 год средняя высота – $2,9 \pm 0,5$ м. Зимостойкость – I.

Таблица 1

Пихта североамериканской флоры в коллекции дендрсада

№ образца	Происхождение разводочного материала	Год появления в коллекции	Место нахождения	Количество, шт.		Сохранность, %	Средние таксационные показатели		Зимостойкость
				в год посадки	2020 г.		H, м	D, см	
<i>Abies balsamea</i> Mill.									
2095	Латвия	Р 1969	д-8	10	6	60,0	15,7±1,2	16,7±3,0	I
3-93	Миннесота, США	1993	д-5	7	5	71,4	8,0±0,3	9,7±0,8	I
			д-8	10	3	30,0	8,0±1,0	10,7±1,3	I
			д-16	3	3	100,0	11,0±0,6	11,3±1,3	I
			усаф	10	9	90,0	5,1±0,3	5,8±0,5	I
<i>Abies fraseri</i> (Pursh) Poit.									
46-81	Липецкая обл., Мещерское	1981	усаф	5	1	20,0	2,5	2,0	I
152-78	Липецкая обл., Мещерское	1978	усаф	6	1	16,7	1,0	н/д	II

Примечание: Р – посадка растениями-саженцами; H – высота; D – диаметр; д-8 (-5, -16) – дендрарий, участок 8 (5, 16); усаф – участок североамериканской флоры; н/д – нет данных.

Таблица 2

Североамериканские виды рода Ель в коллекции дендросада

№ образца	Происхождение разводочного материала	Год появления в коллекции	Место-нахождение	Количество, шт.		Сохранность, %	Средние таксационные показатели		Зимостойкость
				в год посадки	2020 г.		H, м	D, см	
<i>Picea engelmannii</i> Engelm.									
505-72	Литва, Каунас	1972	д-1	5	5	100,0	12,8±1,9	16,4±1,7	I
<i>Picea glauca</i> (Moench.) Voss.									
2057	Латвия, Рига	1968	д-8	17	6	35,3	12,7±2,2	11,0±2,4	I
31-79	Липецк	1979	усаф	11	2	18,2	1,5		I
64-79	Литва, Каунас	1979	усаф	8	1	12,5	3,0	4,0	I
4-93	Канада	1993	усаф	10	9	90,0	7,1±1,1	5,3±0,9	I
			д-8	10	6	60,0	10,3±0,8	13,0±1,2	I
			д-5	10	10	100,0	8,2±0,6	9,7±0,6	I
				30	25	83,3	н/д	н/д	I
<i>Picea mariana</i> (Mill.) Britt. et al.									
5-79	Эстония, Ярвселя	1979	усаф	28	15	53,7	2,9±0,5	2,7±0,6	I
9-93	Канада	1993	д-16	2	1	50,0	2,0	6,0	I
<i>Picea pungens</i> Engelm.									
2058	Латвия, Рига	1968	д-8	17	6	35,3	6,3±2,0	7,7±2,6	I
884-72	Латвия, Рига	1972	д-16	6	2	33,3	16,5±1,5	21,0±5,0	I

Окончание табл. 2

№ образца	Происхождение раз- водочного материала	Год появле- ния в коллекции	Место- нахождение	Количество, шт.		Сохранность, %	Средние таксационные показатели		Зимостойкость
				в год посадки	2020 г		H, м	D, см	
<i>Picea pungens</i> Engelm.									
66-79	Литва, Каунас	1979	усаф	2	1	50,0	1,8		III
37-81	Латвия, Калснава	1981	д-21	52	6	11,5	4,6±0,6	5,0±0,7	I
			д-26	23	11	47,8	6,3±1,1	6,7±1,0	I
			д-26	75	17	22,7	н/д	н/д	I
85-81	Литва, Гирионис	1981	д-3	47	11	23,4	9,2±1,2	10,0±1,2	I
95-85	Архангельск	1985	д-3	34	4	11,8	4,1±0,3	7,5±1,0	I
<i>Picea pungens</i> Engelm. f. <i>glauca</i> Beissn.									
2055	Латвия, Рига	1968	д-8	4	3	75,0	17,3±0,7	17,3±1,3	I
667-71	Москва	Ч 1971	д-5	1	1	100,0	14,0	20,0	I
54-79	Волгоградская обл., Камышин	1979	усаф	28	1	3,6	1,7	2,0	III
<i>Picea pungens</i> Engelm. f. <i>viridis</i> Rgl.									
2056	Горький	1968	д-8	17	2	11,8	17,0±1,0	29,0±3,0	I

Примечание: Ч – посадка растениями-черенками.

P. pungens Engelm. – ель колючая. В естественных условиях встречаются экземпляры высотой 30–45 м. Ареал распространения – юго-запад Северной Америки. В коллекции представлена шестью образцами, выращенными из семян, доставленных из Латвии (1968, 1972 и 1981 гг.), Литвы (1979 и 1981 гг.) и Архангельска (1985 г.). Лучшими таксационными характеристиками отличается дерево, полученное из латвийского материала (1972 г.). Средняя высота в возрасте 48 лет – $16,5 \pm 1,5$ м, средний диаметр – $21,0 \pm 5,0$ см. Сохранность – 33,3 %. Архангельский образец в возрасте 35 лет имеет среднюю высоту $4,1 \pm 0,3$ м, средний диаметр – $7,5 \pm 1,0$ см. Сохранность низкая – 11,8 %, что говорит о невысоком качестве семян местной репродукции. Однако для окончательных выводов необходимо привлечение к испытанию достаточно большого объема семян. Зимостойкость – I (II, III).

P. pungens f. *glauca* (Regel) Beissn. – ель колючая, форма голубая. Название относится ко всем голубохвойным растениям не с серебристой, а с сизо-зеленоватой окраской. В коллекции вид представлен тремя образцами. Два образца (Латвия, 1968 г. и Волгоградская область, 1979 г.) выращены из семян; один (Москва, 1972 г.) – из прививки. Растения из латвийского материала начали цвести в 33 года. Средняя высота в возрасте 52 года составила $17,3 \pm 0,7$ м, средний диаметр – $17,3 \pm 1,3$ см. Сохранность – 75 %. Зимостойкость – I (II, III).

P. pungens f. *viridis* Rgl. – ель колючая, форма зеленая. Выглядит как типичная, но вся хвоя чисто зеленая, без серо-голубых тонов. В коллекции представлена одним образцом (2 экз.), полученным из семян (Горький, 1968 г.). В 52 года средняя высота составляет 17 ± 1 м, средний диаметр – 29 ± 3 см. Сохранность низкая – 11,8 %. Зимостойкость – I (II, III).

Для многих, преимущественно североамериканских видов ели, при продолжении эксперимента потребуются привлечение дополнительного разводочного материала из наиболее северных районов их природных ареалов.

Род *Pseudotsuga* Carr. – лжетсуга, дугласия. Известно 18 видов, из которых 12 произрастает в Северной Америке. В дендрарий было высажено 303 растения дугласии (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) – всего 11 образцов, среди них кроме типичной серая и сизая разновидности. Семена получены из центров интродукции России и других стран. К сожалению, не использовался разводочный материал из природного ареала вида, в частности из Канады. К настоящему времени в дендрарии сохранилось 5 образцов дугласии. (табл. 3).

P. menziesii (Mirb.) Franco. – лжетсуга Мензиса, или дугласия. Обычная высота в естественных условиях составляет 50–75 (до 100) м. Ареал: запад и юг Северной Америки. Верхний предел распространения – 1800 м над ур. м. В дендросаду представлена пятью образцами. Семена получены из Эстонии (1979 г.), Литвы (1981 г.); сеянцы – из Литвы (1976 г.), черенки – из Архангельской (1995 г.) и Московской (2002 г.) областей. Не цветет. В возрасте 15–20 лет высота – 22...340 см. Зимостойкость – I–II (III). Лучшие результаты показывают сеянцы (Литва, 1976 г.) и черенковые растения (Архангельская обл., Соловки, 1988 г.). Соловецкий образец: сохранность – 100 %, зимостойкость – I, средняя высота – $9,0 \pm 1,0$ м, средний диаметр – $10,0 \pm 2,0$ см. Сохранность образцов, выращенных из семян, составляет 2,1...52,3 %.

Таблица 3

Дугласия в коллекции дендросада *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

№ образца	Происхождение разводочного материала	Год появления в коллекции	Место-нахождение	Количество, шт.		Сохранность, %	Средние таксационные показатели		Зимостойкость
				в год посадки	2020 г.		H, м	D, см	
87-81	Литва, Каунас	1981	д-3	47	1	2,1	5,0	6,0	I
279-76	Литва, Каунас	1976	д-8	7	2	28,6	8,5±1,5	9,0±3,0	I
4-79	Эстония, Пуйягу	1979	усаф	68	36	52,9	7,9±0,5	5,9±0,4	I (II)
63-95	Архангельская обл., Соловки	1988	уеф	2	2	100,0	9,0±1,0	10,0±2,0	I
33-01	Московская обл., Королев	2002	д-16	1	1	100,0	0,6	н/д	I (II)

Примечание: уеф – участок европейской флоры.

P. menziesii var. *caesia* (Schver.) Aschers. et Graebn. – лжетсуга Мензиса серая. В коллекции была представлена одним образцом (11 экз.), выращенным из семян, полученных из Липецкой области (1982 г.). Не цвела. В 14 лет высота составила 60–340 см. Отпад произошел в 2011 г.

Для оценки хозяйственных возможностей лжетсуги/дугласии в условиях Европейского Севера России целесообразно привлечение дополнительных образцов вида из наиболее северных районов его природного распространения в Канаде.

Род *Tsuga* (Endl.) Carriere – тсуга. Нами привлекалось для испытания 10 образцов, преимущественно из других пунктов интродукции (Россия (Калининград), Дания, Венгрия, Польша, Латвия), а также из естественного ареала вида (Канада, Монреаль). Всходы появились только у двух образцов и погибли в 1–2-й сезон. По-видимому, испытание новых образцов тсуги канадской *T. canadensis* (L.) Carr. нецелесообразно.

Род *Pinus* L. – сосна (табл. 4). Сосне было уделено максимальное внимание с привлечением к испытанию 27 видов. Для некоторых из них (*Pinus banksiana*, *P. contorta*) использовали образцы различного географического происхождения, с высадкой в дендрарий наибольшего числа растений. К сожалению, не применялся разводочный материал из мест природных ареалов большинства исследуемых видов – некоторые неудовлетворительные результаты (по сосне Банкса и сосне веймутовой) вызывают сомнения. Поэтому целесообразно привлечение для экспериментов дополнительных образцов из наиболее северных районов природных ареалов этих деревьев в Канаде.

P. contorta var. *contorta* Dougl. Doud. – сосна скрученная конторта. В дендросаду представлена одним образцом (2 экз.), выращенным из семян, полученных из Литвы (1987 г.). В возрасте 9 лет имела высоту 40–95 см. Зимостойкость – I. Отпад был в 2012 г., на 25-й год после посадки.

P. contorta var. *murrayana* Balf. – сосна скрученная Муррея. Это небольшое дерево – до 15 м. Естественно произрастает на западе Северной Америки. Образует обширные леса в горах на высоте до 3600 м над ур. м. В коллекции есть один образец (1 экз.). Семена для него были получены из Карелии (1980 г.). Цвел и плодоносил с 7 лет. На 16-й год высота составила 300 см. Отпад произошел в 2011 г., после зимовки в возрасте 31 года.

P. banksiana Lamb. – сосна Банкса. В естественных условиях вырастает до 25 м. В дендросаду представлена единственным образцом (1 экз.), выращенным прививкой. Черенки получены из Москвы (1971 г.). Цветет и плодоносит с 9 лет. В 25 лет высота была 530 см; в 49 – 23 м, диаметр – 24 см. Зимостойкость – I (табл. 4).

P. contorta Loud. var. *latifolia* S. Wats. – сосна скрученная широкохвойная. В естественных условиях достигает высоты 35 м. Внимание специалистов к ней (особенно в Европе) резко возросло после того, как была выявлена способность некоторых ее рас достаточно хорошо расти на неплодородных почвах и в холодных климатических условиях. Особенный интерес *P. contorta* var. *latifolia* S. Wats вызвала у шведских специалистов в области лесоведения. Обобщение интродукционной работы по данному направлению провели Б. Элфвинг, Т. Эрикссон и О. Росвалл, которые выявили, что сосна скрученная производит

Таблица 4

Североамериканские виды рода *Сосна* в коллекции

№ образца	Происхождение разводочного материала	Год появления в коллекции	Место нахождения	Количество, шт.		Сохранность, %	Средние таксационные показатели		Зимостойкость	Год начала	
				1996 г.	2020 г.		H, м	D, см		цветения	плодоношения
<i>Pinus banksiana</i> Lamb.											
664-71	Москва, Ивanteeвка	1971	д-5	1	1	100,0	23,0	24,0	I	1979	1981
<i>Pinus contorta</i> Dougl. var. <i>latifolia</i> S. Wots.											
7-79	Канада, Британская Колумбия, Вонован	1979	усаф	15	6	40,0	15,3±0,6	19,7±2,2	I	1984	1985
54-83	Канада, Юкон	1983	д-8	18	12	66,7	15,0±0,6	20,6±1,5	I	1993	1996
31-86	Канада, Юкон	1986	д-8	20	17	85,0	20,7±0,7	21,3±0,9	I	1995	1996
2-87	Архангельск, д/с СевНИИЛХ	1987	д-8	7	4	57,1	13,0±0,6	20,8±1,6	I	1996	1996
55-87	Литва, Гирионис	1987	д-15	4	1	25,0	6,0	8,0	I	2003	2003

на 36 % больше древесины, чем сосна обыкновенная, в одинаковых условиях произрастания [19].

На целесообразность всестороннего интродукционного испытания североамериканской сосны *P. contorta* Dougl. в условиях таежной зоны европейской части СССР указывали С.Д. Георгиевский [3], Д.Я. Гиргидов [4], И.С. Мелехов [12] и др.

Интродукционное испытание сосны скрученной в дендросаду проводится нами с 1975 г. В коллекции она представлена пятью образцами, выращенными из семян, полученных из Канады (1979, 1986 гг.), Литвы (1987 г.), Латвии (1987 г.), и семян репродукции дендросада (1987 г.). Цветут и плодоносят. Зимостойкость – I. Высокой сохранностью отличаются образцы канадского происхождения – 66,6–85,0 %. Сохранность образца местной репродукции также относительно высокая – 57,1 %. Положительные результаты выращивания в дендрологическом саду *P. contorta* Loud. var. *latifolia* S.Wats. позволили выделить эту североамериканскую сосну для дальнейшего интродукционного испытания в опытных плантационных посадках региона. Из использованных образцов семян, большей частью из северных районов природного ареала этой сосны, выращено 104,2 тыс. сеянцев, которые были высажены на плантациях, расположенных в Архангельской и Вологодской областях, Республике Коми.

Как уже отмечалось в наших предыдущих исследованиях [7], из североамериканских видов рода сосна *P. contorta* Dougl. имеет самый обширный ареал: леса с ее преобладанием занимают около 6 млн га в США и почти 20 млн га в Канаде [24].

Отражением существующей географической изменчивости вида *P. contorta* Dougl. является разделение ее на 4 таксона, которые в настоящее время признаются в качестве разновидностей или подвидов:

P. contorta ssp. *contorta* (Shore pine) – прибрежная разновидность, известная как небольшое, 3–12 (15) м высотой, обычно суковатое и корявое дерево;

P. contorta ssp. *bolanderi* – с «островным» местообитанием в Калифорнии, округ Мендосина, очень низкое – до 1,5 м высотой;

P. contorta ssp. *murrayana* – горная разновидность, распространена в Сьерра-Неваде и Каскадных горах, занимает юго-западную часть естественного местопроизрастания вида и характеризуется наиболее медленным ростом в высоту;

P. contorta ssp. *latifolia* (Lodgepole pine – сосна скрученная) – покрывает большую часть ареала вида, континентальная или горная разновидность высотой до 40, а по некоторым сведениям – до 60 м, с прямым стволом и конусообразной кроной (ранее выделялась как самостоятельный вид и называлась *P. murrayana* Crev. a. Balf., под этим видовым эпитетом была интродуцирована как лесопромышленная порода в Западную Европу).

P. contorta var. *latifolia*, отличающаяся быстрым ростом в молодом возрасте, формирующая к 40–50 годам около 250–300 м³/га малосмолистой древесины, пригодной как для сульфатной, так и для сульфитной варки целлюлозы, может быть основной породой для плантационного выращивания балансовой древесины на Европейском Севере. Использование в плантационных посадках и является основной целью интродукции сосны скрученной широкохвойной в европейскую часть России, причем зоной ее культивирования здесь должны

быть северная и средняя тайга в пределах Архангельской, Вологодской областей, республик Коми и Карелии [8].

Установлено, что как вид сосна скрученная широкохвойная в условиях Архангельской области вполне устойчива. По сравнению с местной сосной она характеризуется более продолжительным ростом побегов и большей абсолютной величиной их суточного прироста, имеет значительно лучше развитый ассимиляционный аппарат. По данным наших ранних исследований [16], в возрасте 10 лет охвоенность побегов сосны скрученной в 1,5–2,2 раза больше, чем у сосны обыкновенной, а общая масса хвои – в 2,1. Североамериканская сосна отличается быстрым ростом и превосходит местную по высоте в 1,5 раза к 7–11 годам. Обгоняя сосну обыкновенную и по темпам радиального роста по диаметру, североамериканская сосна к 10 годам имеет в 4 раза больший объем ствола.

По результатам изучения состояния, процессов роста и развития сосны скрученной на экспериментальных участках [8] сделан вывод, что плантации следует создавать в продуктивных типах леса зеленомошной группы (кисличники, черничные свежие) и не рекомендуется – на бедных почвах в лишайниковых типах леса.

Заключение

Таким образом, в результате привлечения к интродукции в течение многолетнего периода североамериканских видов семейства *Pinaceae* Lindl. в регионе впервые проведено широкомасштабное испытание инорайонных хвойных пород, создана коллекция, включающая в настоящее время 2 вида пихты, 4 вида и 3 формы ели, 2 вида сосны и 1 вид дугласии. Многие из них представляют как научный, так и практический интерес для лесной отрасли.

Наилучшие результаты интродукционного испытания североамериканских видов семейства сосновые получены для таких пород, как сосна скрученная, пихта бальзамическая, ель Энгельмана, ель канадская, ель колючая, лжетсуга Мензиса. Их хозяйственная ценность для Европейского Севера России не вызывает сомнения: это и плантационное выращивание быстрорастущих пород для потребностей целлюлозно-бумажной промышленности, и расширение ассортимента для озеленения населенных пунктов.

В настоящее время продолжают работы по испытанию одной из самых перспективных пород североамериканской флоры, сосны скрученной, уже с использованием семенного материала местной репродукции.

В процессе испытания выявлены некоторые проблемы, связанные с неудачным выбором места посадки в условиях дендросада (отдельные экземпляры, например дугласия, оказались угнетенными другими породами), отсутствием возможности использования в работе нужного разводочного материала в достаточном количестве для получения объективной оценки перспективности интродукции. В связи с чем сделан вывод о целесообразности повторного исследования ряда видов.

Целесообразна и закладка в регионе опытно-производственных культур, аналогичных уже созданным посадкам североамериканской *Pinus contorta* var. *latifolia*. Концентрация в 2-3 лесничествах нашего региона таких опытно-производственных культур из пихты бальзамической, пихты Фразера, лиственницы американской, ели белой (канадской), ели Энгельмана, ели черной, ели ситхинской, сосны Банкса, сосны скрученной широколистной, сосны желтой,

а также дугласии с привлечением для каждого вида нескольких происхождений семян из наиболее северных районов его природного ареала позволит создать ценнейший интродукционный объект, который будет иметь огромное научное и практическое значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев В.М. Лесокультурные испытания перспективных пород интродуцентов на территории Новгородской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2009. 19 с.
Alekseev V.M. *Forest Culture Tests of Promising Introduced Species in the Novgorod Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2009. 19 p.
2. Алексеев В.М., Жигунов А.В., Бондаренко А.С., Бурцев Д.С. Интродукция сосны скрученной в условиях Ленинградской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 3. С. 24–33.
Alekseev V.M., Zhigunov A.V., Bondarenko A.S., Burtsev D.S. Introduction of *Pinus contorta* in the Leningrad Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 3, pp. 24–33. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/7af/lkh3.pdf>
3. Георгиевский С.Д. О натурализации древесных пород в Финляндии // Лесопром. дело. 1927. № 7-8. С. 17–19.
Georgiyevskiy S.D. On the Naturalization of Tree Species in Finland. *Lesopromyshlennoye delo*, 1927, no. 7-8, pp. 17–19.
4. Гиргидов Д.Я. Интродукция древесных пород на Северо-Западе СССР. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. 48 с.
Girgidov D.Ya. *Introduction of Tree Species in the North-West of the USSR*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1955. 48 p.
5. Гусева Н.Ю. Интродукция лжетсуги Мензиса в северной подзоне смешанных лесов // Вестн. МГУЛ. – Лесн. вестн. 2010. № 3. С. 126–131.
Guseva N.U. *Pseudotsuga menziesii* as an Important Tree Stand Component in Yaroslavl Region. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2010, no. 3, pp. 126–131.
6. Демидова Н.А., Дуркина Т.М. Каталог коллекции древесных растений дендрологического сада имени В.Н. Нилова / ФБУ «СевНИИЛХ». Архангельск: Правда Севера, 2013. 140 с.
Demidova N.A., Durkina T.M. *Catalogue of Woody Plants Collection of the Dendrological Garden named after V.N. Nilov*. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 2013. 140 p.
7. Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г. и др. Изучение биологического разнообразия древесных растений *ex situ* в дендрологическом саду ФБУ «СевНИИЛХ»: отчет о НИР (заключительный) / ФБУ «СевНИИЛХ». Архангельск, 2019. 179 с.
Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G. et al. *Study of Biodiversity of Woody Plants ex situ in the Dendrological Garden of the Federal Budget Institution "Northern Research Institute of Forestry" (NRIF): Final Research Report*. Arkhangelsk, 2019. 179 p.
8. Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Демиденко С.А., Быков Ю.С., Парамонов А.А. Рост и развитие сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) в условиях северной тайги // Тр. СПбНИИЛХ. 2016. № 2. С. 45–59.
Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Demidenko S.A., Bykov Y.S., Paramonov A.A. Growth and Development of a Lodgepole Pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) in a Northern Boreal Forest. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute], 2016, no. 2, pp. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.42>
9. Калущкий К.К. Североамериканские древесные экзоты в России // Лесн. хоз-во. 1993. № 3. С. 39–40.

Kalutskiy K.K. North American Woody Exotic Species in Russia. *Lesnoye khozyaystvo*, 1993, no. 3, pp. 39–40.

10. *Кищенко И.Т.* Рост и развитие интродуцированных хвойных видов деревьев в условиях Карелии: науч. электрон. изд. Петрозаводск: ПетрГУ. 2015. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Kishchenko I.T. *Growth and Development of Introduced Coniferous Tree Species in Karelia*: Scientific Electronic Publication. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2015. CD-ROM.

11. *Лапин П.И.* Сезонный ритм развития древесных растений и его значение для интродукции // Бюл. ГБС. М., 1967. Вып. 65. С. 13–18.

Lapin P.I. Seasonal Rhythm of Development of Woody Plants and Its Significance for Introduction. *Vyulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1967, iss. 65, pp. 13–18.

12. *Мелехов И.С.* Интродукция хвойных в лесном хозяйстве // Лесоведение. 1984. № 6. С. 72–77.

Melekhov I.S. Introduction of Conifers in Forestry. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1984, no. 6, pp. 72–77.

13. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. М.: ГБС АН СССР. 1975. 28 с.

Methods of Phenological Observations in Botanical Gardens of the USSR. Moscow, GBSAD AN SSSR Publ., 1975. 28 p.

14. *Нилов В.Н.* Древесные растения дендрологического сада АИЛиЛХ. Архангельск: АИЛиЛХ, 1980. 68 с.

Nilov V.N. *Woody Plants of the Dendrological Garden of the Arkhangelsk Forest and Forest Chemistry Institute*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1980. 68 p.].

15. *Раевский Б.В.* Некоторые результаты интродукционных испытаний сосны скрученной в Южной Карелии // Уч. зап. ПетрГУ. 2009. № 7(101). С. 51–59.

Raevsky B.V. Some Results of Introductory Tests for Lodgepole Pine in Southern Karelia. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University], 2009, no. 7(101), pp. 51–59.

16. *Стафеев Б.Л.* Северо-американская сосна скрученная – перспективная порода для интродукционного испытания в Архангельской области // Вопросы интродукции хозяйственно ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск, 1989. С. 35–43.

Stafeev B.L. North-American Lodgepole Pine – a Perspective Species for Experimental Introduction in the Arkhangelsk Region. *Issues of the Introduction of Economically Valuable Tree Species to the European North*. Arkhangelsk, 1989, pp. 35–43.

17. *Федорков А.Л., Туркин А.А.* Экспериментальные культуры сосны скрученной в Республике Коми // Лесоведение. 2010. № 1. С. 70–74.

Fedorov A.L., Turkin A.A. Test of Shore Pine in the Republic of Komi. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2010, no. 1, pp. 70–74.

18. *Фирсов Г.А., Хмарик А.Г., Орлова Л.В., Бялт В.В.* Ассортимент хвойных в озеленении Санкт-Петербурга на рубеже веков: тенденции и перспективы // Вестн. Волгоградск. гос. ун-та. Сер. 11, Естеств. науки, 2016. № 2(16). С. 7–21.

Firsov G.A., Khmarik A.G., Orlova L.V., Byalt V.V. Assortment of Conifers for Planting Saint Petersburg at the Edge of Centuries: Tendencies and Prospects. *Vestnik Volgogradskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya 11, Estestvennyye nauki* [Bulletin of the Volgograd State University. Series 11. Natural Sciences], 2016, no. 2(16), pp. 7–21. DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu11.2016.2.1>

19. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The Introduction of Lodgepole Pine for Wood Production in Sweden – a Review. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 141, iss. 1-2, pp. 15–29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00485-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00485-0)

20. Ericsson T. *Lodgepole pine (Pinus contorta var. latifolia) Breeding in Sweden – Results and Prospects Based on Early Evaluations*. Thesis. Umeå, SLU, 1994. 325 p.

21. Lingren D., Krutzsch P., Twetman J., Riellander C.L. *Survival and Early Growth of Pinus contorta Provenances in Northern Sweden*. Rapporten och Uppsatser. Research Notes. Institutionen for Scogsgenetik, no. 20, 1976. 42 p.

22. Ruotsalainen S. Tree Species Experiments at the Northern Timberline Region in Finland. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 9-2, pp. 51–60.

23. Ruotsalainen S., Velling P. *Pinus contorta* from Untamed Forest to Domesticated Crop. *Proceedings of a Meeting with IUFRO Working Party S2.02.06 "Pinus contorta Provenances and Breeding" and "Frans Kempe Symposium"*. Ed. by D. Lindgren. Umeå, Sweden, 1993, Report 11, pp. 122–136.

24. Varmola M., Salminen H., Rikala R., Kerkelä M. Survival and Early Development of Lodgepole Pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 15, iss. 4, pp. 410–423. DOI: <https://doi.org/10.1080/028275800750172619>

25. Wheeler N.C., Critchfield W.D. The Distribution and Botanical Characteristics of Lodgepole Pine: Biogeographical and Management Implications. *Lodgepole Pine: The Species and Its Management – Symposium Proceedings*. Ed. by D.M. Baumgartner et al. Pullman, WA, WSU, 1985, pp. 1–13.

REPRESENTATIVES OF THE PINE FAMILY (*Pinaceae* Lindl.) OF THE NORTH AMERICAN FLORA IN THE COLLECTION OF THE DENDROLOGICAL GARDEN NAMED AFTER V.N. NILOV (NRIF)

Natalia A. Demidova, Candidate of Biology, Leading Research Scientist;
ResearcherID: [T-1151-2019](https://orcid.org/0000-0003-2673-2309), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2673-2309>

Tatiana M. Durkina, Research Scientist; ResearcherID: [ABE-1634-2020](https://orcid.org/0000-0001-7389-1404),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7389-1404>

Liudmila G. Gogoleva, Research Scientist; ResearcherID: [ABE-1664-2020](https://orcid.org/0000-0002-4876-892X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4876-892X>

Natalia N. Vasiljeva, Candidate of Agriculture, Research Scientist;
ResearcherID: [ABE-1644-2020](https://orcid.org/0000-0002-7245-8120), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7245-8120>

Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: forestry@sevniilh-arh.ru

Abstract. The article presents the results of the introduction of the North American flora woody species of the pine family (*Pinaceae* Lindl.) to the European North of Russia. The research purpose is to select the most valuable specimens for introduction into northern conditions from the tree species collection. The research has involved experimental, calculation, analytical, and comparative methods. The conclusion on the result of the introduction of a particular plant was based on the materials of long-term phenological observations, which were carried out according to the method of botanical gardens improved for the conditions of the European North of Russia. As a result of the introduction of North American species of the *Pinaceae* Lindl. family to the region, a large-scale test of foreign conifers was carried out for the first time; a collection of 2 species of fir, 4 species and 3 forms of spruce, 2 species of pine, and 1 species of Douglas fir was created. Most attention was paid to the introduction of species of the genus *Pinus*. Positive results of cultivation of *Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats. in the Dendrological garden allowed us to select it for further introduction testing in experimental plantations of the region. On plantations located in the Arkhangelsk and Vologda regions and the Komi Republic, 104.2 thousand seedlings were grown from the seed samples, mostly from the northern natural range of this pine. Unfortunately, not all of the breeding material for the North American pine species tested was derived from natural growth sites, which puts

into question some of the unsatisfactory results. Therefore, for Jack pine and Weymouth pine, it is advisable to use in testing additional samples from the most northern regions of their natural ranges in Canada. Many of these species are of both scientific and practical interest for forestry. To assess the economic value of those introduced species, adaptive capabilities of which in the conditions of the European North according to the results of studies are not in doubt, it is advisable to lay out pilot plantations in the region, similar to the already created plantings of North American lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats.). The concentration of different species like balsam fir (*Abies balsamea* Mill.), Fraser fir (*Abies fraseri* (Pursh.) Poir.), American larch (*Larix laricina* (Du Roi) K.Koch.), Canadian spruce (*Picea glauca* Voss.), Engelmann's spruce (*Picea engelmannii* Engelm.), black spruce (*Picea mariana* Britt.), Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.), lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats.), and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.), involving several seed origins from the most northern regions of its natural range for each, in 2-3 forest areas will allow creating a valuable introduction object; scientific and practical importance of those mentioned cannot be overestimated.

For citation: Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Vasiljeva N.N. Representatives of the Pine Family (*Pinaceae* Lindl.) of the North American Flora in the Collection of the Dendrological Garden named after V.N. Nilov (NRIF). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 36–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-36-54

Funding: This work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Forestry Agency, registration No. НИОКТР 115042310018.

Keywords: *Pinaceae*, introduction, North American flora, European North of Russia, winter hardiness, fir, pine, spruce, Douglas fir, lodgepole pine.

УДК 630*453:595.768.24+630*416.16

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-55-67

ЗАЩИТА ЕЛОВЫХ ЛЕСОВ ОТ ВСПЫШЕК *Ips typographus* (ОБЗОР)

Н.Р. Пирцхалава-Карпова¹, инж.; *ResearcherID:* [AAB-1262-2020](https://orcid.org/0000-0002-9527-4631),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-4631>

А.А. Карпов¹, зам. директора по охране территории и экологической безопасности;

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

Е.Е. Козловский¹, зам. директора по научной работе; *ResearcherID:* [AAB-1558-2020](https://orcid.org/0000-0003-4785-898X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4785-898X>

М.Ю. Грищенко^{1,2,3}, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр., инж., доц.;

ResearcherID: [L-9961-2015](https://orcid.org/0000-0003-3223-7697), *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3223-7697>

¹Государственный заповедник «Курильский», ул. Заречная, д. 5, пгт. Южно-Курильск, Сахалинская область, Россия, 694500; e-mail: heynanabl@gmail.com, kurilskiy@mail.ru, lesnoy.monitoring@gmail.com

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, д. 1, Москва, Россия, 119991; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Покровский б-р, д. 11, Москва, Россия, 109028

Аннотация. Вспышкам *Ips typographus* (L.), причиной которых стали катастрофические природные явления в Центральной Европе, Сибири и на Дальнем Востоке, посвящены многочисленные научные исследования. Для анализа отношений и происхождения видов *Ips* были использованы молекулярные методы. Детально изучены биологические характеристики *I. typographus*: жизненные параметры, влияние на которые оказывает температура, и поведение в полете. Обнаружено, что еловый короед рассеивается в пределах 500 м. Однако его новые атаки происходят в непосредственной близости от старых очагов. Решающее значение для успешности деятельности вредителя имеют механизмы восприимчивости и защиты деревьев. Их экземпляры, пораженные болезнью, отвечают предварительно сформированной смолой, реакциями на раны и в конечном итоге системными изменениями на физиологическом уровне. Риск нападения *I. typographus*, связанный с местопроизрастанием, возрастом, характером поступления питательных веществ и воды, был оценен как на уровне дерева, так и на уровне леса в целом. Динамика вспышек в значительной степени зависит от численности *I. typographus*, восприимчивости к нему деревьев, погодных условий и принятых фитосанитарных мер. Короед *I. typographus* является неотъемлемым компонентом любой лесной экосистемы. Он колонизирует ослабленные, слабые или мертвые деревья и таким образом начинает процесс разложения коры и древесины. Данный вредитель способен использовать недолговечные ресурсы и быстро размножаться до чрезвычайно больших количеств. Это происходит, например, после ветров. В таких эпидемических ситуациях *I. typographus* может представлять серьезную угрозу для лесов, богатых елью, особенно для насаждений, расположенных за пределами территории с оптимальными для данного вида условиями. В целях исследования потенциальной взаимозависимости климатических, специфических, фитосанитарных факторов и динамики заражения с помощью анализа геопространственных данных и методов множественной регрессии может быть изучено пространственное развитие заражений *I. typographus*. Также рассматриваются различные методы контроля лесов и подчеркивается необходимость применения более сложных инструментов оценки рисков появления *I. typographus*.

Для цитирования: Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А., Козловский Е.Е., Грищенко М.Ю. Защита еловых лесов от вспышек *Ips typographus* (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 55–67. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-55-67

Ключевые слова: *Ips typographus*, лесная экосистема, экология, управление лесами, ельники.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there is no conflict of interest

Последнее десятилетие на Дальнем Востоке, в Сибири и Европе было отмечено тайфунами и штормами. Их можно охарактеризовать как катастрофические, они вызвали значительное распространение короеда (*Ips typographus*) в хвойных лесах. Масштабы нанесенного вредителем ущерба огромны и потребовали больших финансовых вложений в расчистку территорий от ветровалов и санитарные рубки. Этим обусловлена необходимость поднятия вопросов эффективности и назначения традиционных фитосанитарных мер – появилось множество исследований экологических, экономических и фитосанитарных аспектов *I. typographus*, а также работы о его развитии и поведении. Возникли также и вопросы, касающиеся сложных взаимодействий между популяционной динамикой и естественной регуляцией *I. typographus*, управлением лесами и восприимчивостью деревьев к этому виду короеда. Обилие новых открытий в области изучения *I. typographus* в Европе и России за последние 20 лет, означает, что нужно обобщить и проанализировать полученные учеными результаты, тем самым дополнив более ранние обзоры. Нами рассматривается литература, о *I. typographus* и его естественных врагах, опубликованная в период с 1989 по 2019 г. Особое внимание уделяется европейским исследованиям, поскольку присутствие *I. typographus* является для Европы, наравне с Дальним Востоком и Сибирью, естественным, а также научным исследованиям и анализам (не описательным отчетам).

Филогенетика. Исследователь Байерс проанализировал генетический состав европейских популяций *I. typographus* с помощью молекулярных методов [10–12]. В Центральной Европе были обнаружены различные гаплотипы, в то время как в Скандинавии присутствовал только один из них. На Дальнем Востоке России представлен отдельный гаплотип. Байерс предполагает, что во время последнего ледникового периода популяция *I. typographus* вместе с *Picea abies* Karst. переместились в районы-убежища, на юг (Апеннинские, Динарские и Карпатские Альпы), а также к северу от Москвы. С постледниковым потеплением еловый короед переселился из Апеннинских и Динарских Альп в прежние районы, в то время как ареал ели продвинулся на восток. *I. typographus* тесно связан с *I. amitinus*, *I. cembrae* и *I. acuminatus* [55].

Развитие. Большинство аспектов развития и размножения взрослых особей, а также поведения *I. typographus* давно известны [8, 45]. Однако только недавно было детально проанализировано влияние температуры на темпы его развития [20, 30]: с использованием линейной зависимости между данными показателями рассчитан нижний порог развития – 8,3 °С (т. е. минимальная температура, при которой *I. typographus* может развиваться); по нелинейной модели нижний порог – 6 °С.

Исследована репродукция *I. typographus* [55]. Обнаружено, что нижний порог яйценоскости – 11,4 °С (линейная модель). С помощью нелинейных моделей была рассчитана оптимальная температура: 30,4 °С – для развития и 28,9 °С – для размножения [51]. Такие данные являются предпосылками для построения имитационных моделей динамики популяции короеда.

Внутривидовая конкуренция при высокой плотности размножения влияет на поведение *I. typographus*. Она становится причиной более коротких материнских проходов и, следовательно, уменьшения яйцекладки [31, 52]. Оптимальная плотность составляет примерно 500 материнских галерей/м² [50]. Каждая семья состоит из самца и двух или трех самок, которые вместе строят систему галерей. Таким образом, самки откладывают до 80 яиц [27], чаще на той стороне материнской галереи, которая меньше всего мешает другим

материнским галереям. Соотношение полов у потомства зависит от фазы градации. Это можно было наблюдать во время вспышки *I. typographus* в Татрах в период с 1990 по 1995 г. [26]. В ее начале (т. е. в фазе пролиферации) доля самок увеличилась более чем на 50 %, а к концу (ретроградация) вновь приблизилась к прежнему уровню (50 %). Такая закономерность повлияла и на размер семейств: система галерей каждого самца состояла в основном из трех материнских галерей. Некоторые ключевые выводы приведены в таблице.

Результаты исследований *Ips typographus*

Особенность	Данные
<i>Биология</i>	
Минимальная температура для развития	6,0–8,3 °С
Минимальная температура для яйцекладки	11,4 °С
Оптимальная температура для развития и яйцекладки	29–30 °С
Репродуктивность	До 80 яиц/самка
Соотношение полов (% самок)	50 % (ретроградация), 50 % (проградация)
Зимняя смертность	≈50 %
Оптимальная плотность размножения	≈500 материнских галерей
Оптимальный размер семейства	3 самки
Минимальная температура для полета	16,5 °С
Оптимальная температура полета	22–26 °С
Основное время полета	Полдень, раннее утро
Минимально необходимое количество дней с необходимой температурой	3–4 дня подряд
<i>Порог полета для успешной атаки на живые деревья</i>	
Активная дальность полета	>500 м
<i>Естественные враги</i>	
Самые важные группы насекомых	Долихоподидные мухи, птеромалидные осы, браконидные осы
<i>Восприимчивость</i>	
Механизмы защиты	Накопление смол, токсинов, ухудшение качества пищевых продуктов, реакция на рану
Деревья с высоким риском	Произрастающие с южной и западной стороны, освещенные солнцем, возраст >70–100 лет
Радиус более высокого риска атаки вокруг заражения	100 м
<i>Вспышка</i>	
Причины вспышек / длительность вспышек	Ветер, засуха, высокие температуры и др.
<i>Управление</i>	
Оптимальный срок для санитарных рубок	Между заражением и появлением первого поколения
Расчетный коэффициент вылова феромонными ловушками	3–10 % от общего количества
Оптимальное расположение феромонных ловушек	Южное направление
Размер фитосанитарной буферной зоны вокруг заповедников	500 м (100–1500 м)
Смертность короеда при механической окорке	93 %

Смертность в зимний период может быть объяснена как биотическими, так и абиотическими факторами. Ее уровень около 50 % для жуков *I. typographus*, переживающих это время в ветровалах, объясняется понижением температуры воздуха до 10 °С [29]. Обнаружено, что появление и миграция короедов моновольтных поколений зависит от географической широты: северные популяции появились позже и мигрировали перед зимовкой реже, чем южные [21].

Летная активность. Суточная активность полета составляет примерно 13 часов – с 9 до 21 часа, наибольшая активность приходится на полдень и начало дня [1, 2, 13]. Подобное распределение объясняется различиями температуры воздуха: минимальная температура для полета – 16,5 °С, оптимальная – 22...26 °С [11]. Есть и верхний порог – 30 °С [6, 18]. У самцов этот период начинается раньше, чем у самок, поскольку первые должны находить и колонизировать восприимчивые деревья и готовить брачные камеры. Исследования, проведенные в одном из чешских университетов, подтвердили, что для успешного нападения на живые деревья весной необходимо по крайней мере 3–4 теплых дня подряд при температурах, значительно превышающих порог размножения [5, 19, 26].

Феромоны. Известно, что агрегационные феромоны *I. typographus* состоят из терпеноидов, которые биосинтезируются из компонентов древесной смолы. Конспецифических короедов привлекают эти внутривидовые семиохимические вещества, когда имеется подходящий субстрат для размножения. Для данного вида жуков они оказываются гораздо более заметными, чем летучие вещества (кайромоны), выделяемые елями [3, 16, 17]. Однако есть свидетельства продуцирования короедами репеллентных феромонов, субстрат которых не подходит для размножения. Ловушки с приманкой Pherograh и антиагрегационным феромоном вербеноном или летучим (+) – альфа-пиненом улавливают только 2–30 % от общего количества жуков [4, 7, 22, 50]. Пиненовый компонент также предотвращал атаку на хвойные деревья, вербенон этого не делал. Ранее проведенная работа показала, что запасы энергии у особей *I. typographus* должны быть истощены, прежде чем жуки начнут реагировать на феромоны [16, 17].

Естественные враги. До недавнего времени естественным врагам короедов отводилась лишь незначительная роль. Среди насекомых наиболее распространенными уничтожителями *I. typographus* являются хищные жуки (*Cleridae*) и мухи (*Dolichopodidae*), а также паразитические осы (*Pteromalidae*, *Braconidae*) [7, 15, 33, 49, 53]. Биология большинства этих видов достаточно хорошо описана [37]. Например, известно, что паразитические осы птеромалиды предпочитают гладкую поверхность коры. В пределах одного и того же дерева они более распространены в верхней части стебля, где кора тоньше [50].

Паразитоиды находят своих хозяев с помощью оптических, тактильных, вибрационных, термических или обонятельных раздражителей. Исследования некоторых важных браконидных и птеромалидных ос показали, что обнаружение хозяина наиболее вероятно происходит с помощью летучих веществ [32]. Эти сигналы (например, насыщенные кислородом монотерпены) образуются при взаимодействии хозяина или интродуцированных микроорганизмов с тканью коры [46]. Жуки-клириды реагируют на те же феромоны, что и их жертва [9]. Вспышки *I. typographus* вызывают увеличение популяций их естественных врагов. В части Швеции, где была вспышка *I. typographus*, кланового жука *Thanasimus formicarius* (L.) обнаружили в 10 раз больше, чем в регионе без вспышки [27].

Аналогичным образом естественные (неуправляемые человеком) еловые насаждения, подвергающиеся нападению *I. typographus*, содержали в 2–3 раза больше хищников, чем управляемые леса без нападения короеда, хотя уровни распространения данного вида жуков были сопоставимы [30]. На появление естественных врагов и эффективность уничтожения ими *I. typographus* также влияют лесоводческие практики. Существуют данные о том, что хищники могут быть более чувствительными к определенным методам воздействия на древостои по сравнению с их жертвами [30]. Однако это не означает, что естественные враги короеда (особенно *T. formicarius*) многочисленнее в неуправляемых лесах [53]. Сообщалось, что патогенные микроорганизмы, такие как вирусы и микроспоридии, встречаются чаще в поздних стадиях развития *I. typographus*, чем в ранних [37].

Жук *T. Formicarius* – заметный и хорошо изученный хищник. Каждая личинка потребляет примерно 50 личинок короеда во время своего развития. Взрослый жук в течение всей жизни поедает около 100 особей *I. typographus*. При высокой плотности *T. formicarius* наблюдаются каннибализм или эмиграция [49]. К числу наиболее важных факторов смертности, воздействующих на личинки короеда, относятся и хищные мухи *Medetera* [40], хотя потребление ими личинок составляет всего 5–10 (за всю жизнь одной особью).

Относительно высокие показатели смертности *I. typographus* от естественных врагов были выявлены в ходе краткосрочных исследований. Байерс зафиксировал локальный уровень паразитизма до 30 % [12]. В то же время, 3-летнее исследование в Национальном парке Баварии не позволило выявить последовательной закономерности в развитии антагонистических видов [40]. Холодные температуры в зимнее время одинаково вредны для паразитоидов и короедов [18]. Местные популяции короеда в существующих местах заражения могут пополняться путем иммиграции *I. typographus*, но не, например, *T. formicarius* [50].

Восприимчивость деревьев. Здоровые деревья обладают защитными механизмами на нескольких уровнях, чтобы мешать атакующим короедам успешно выводить семейства. Эти механизмы были подробно изучены в полевых и лабораторных условиях [29].

Первый уровень защиты – высвобождение запасенной смолы при попытках жуков проникнуть в кору. Это называется первичным, предварительным сформированным сопротивлением [29]. Ели с толстой корой и плотными смоляными протоками более эффективны в защите, чем особи с низким содержанием смолы [29]. Деревья в смешанных насаждениях имели поток первичной смолы выше по сравнению с чистыми еловыми насаждениями [29]. После исчерпания предварительно сформированного сопротивления происходила его замена индуцированными механизмами сопротивления.

Второй уровень защиты дерева включает изменение местного метаболизма вокруг входного отверстия. Производятся защитные химические вещества, такие как процианидин [29].

Третий уровень защиты – системное изменение метаболизма всего дерева. Это приводит к производству меньшего количества углеводов, но большего количества белков, которые необходимы для защиты.

На последнем этапе, когда плотность атаки высока, возникает реакция на рану, вновь образуются протоки ткани и смолы. Поэтому считается, что успеш-

ная атака короеда включает 2 последовательных этапа: защита дерева истощается и происходит его окончательная колонизация вредителями [5, 28].

Возраст ельников непосредственно связан с их восприимчивостью к атакам короеда. В основном подвергаются нападению деревья, находящиеся на южных склонах и освещенные солнцем, особенно после резкого повышения уровня солнечной радиации [24, 38]. Кроме того, была обнаружена предрасположенность к нападению особей старше 70 лет [6, 35, 36]. Проведено несколько анализов с целью оценки факторов, влияющих на восприимчивость деревьев к *I. typographus*. Регрессионный анализ показывает, что питательные вещества почвы, такие как азот, фосфор и магний, оказывают существенное влияние на нападения *I. typographus* [34].

Отмирание зараженного дерева является результатом не только нападения *I. typographus*, но и деятельности связанных с жуками грибов, таких как виды *Ophiostoma* и *Ceratocystis* [48]. В основном они обитают на переднеспинке и надкрыльях короеда. Было доказано, что ряд видов грибов связан с *I. typographus* [44, 47]. Обнаружено: среди различных видов короедов *I. typographus* несут больше патогенных грибов в сравнении с другими [43]. Атакованные деревья погибают быстрее, чем это произошло бы, если бы они питались исключительно флээмидлингом из-за кормления личинок. Грибы могут сушить ткани и вызывать аспирацию трахеиды или закупорку сосудов [44].

Управление I. typographus. Целью борьбы с короедами является минимизация атак на живые деревья. Наиболее часто применяемые меры: санитарная рубка зараженных деревьев и установка феромонных ловушек.

Феромонные ловушки. Ключевым компонентом феромонных приманок является цис-вербенол. Количество жуков-короедов, пойманных в ловушки с феромонами, очень сильно зависит от условий окружающей среды и местных условий, таких как температура, солнечное облучение и конкуренция со стороны близлежащих восприимчивых к вредителю деревьев. Например, было обнаружено, что приманки, установленные южнее, захватывают в 4 раза больше *I. typographus* по сравнению с расположенными севернее. Ежегодные уловы могут быть соотнесены с температурами мая и июня предыдущего года. Большинство авторов ставят под сомнение эффективность приманок с феромонами в качестве меры сокращения популяций короедов. Было подсчитано, что с высокой плотностью попадает в ловушку только до 10 %. В одном исследовании описано: 24 ловушки/га поймали лишь примерно 3 % *I. typographus* [16].

Л. Вихманн и Х. Равн [54] не обнаружили зависимости между числом попавших в ловушки короедов и плотностью атаки деревьев, вокруг которых были расположены приманки. Эти результаты отличаются от полученных ранее. Значительные уловы не обязательно коррелируют с высокими уровнями заражения, но низкие уловы обычно означают, что ущерб будет небольшим [53]. Приманки чаще используются для предотвращения нападений на живые деревья, чем для уменьшения популяций *I. typographus*. Этот подход рассматривается как разумная мера защиты [24], хотя требует значительных усилий [25]. По сообщению польских ученых [24], фронт заражения зашел в тупик через год, когда использовался двухрядный барьер из ловушек с феромонами. В Бельгии все еще применяются живые ловушки, заполненные феромонами и обработанные инсектицидами. Этот вид устройств привлекал в 30 раз больше жуков,

чем распространенная Theyson, особенно когда приманка была защищена от солнца [25]. Широкое применение ловушек, количество которых зависит от атакованных в предыдущем году деревьев, защищает от непредвиденных ситуаций.

Дальнейшие техники. Для защиты древесины в основном используются обычные химические инсектициды. Их применение варьируется в зависимости от законодательства разных стран. Сообщается, что системные химические вещества защищают отдельные восприимчивые к *I. typographus* деревья [33].

Управляемые леса и лесные заповедники. Неуправляемые хвойные леса не обязательно имеют более высокую популяцию *I. typographus*. В ходе шведского исследования [39] выявлена такая же плотность короеда, или даже ниже, чем в окружающих управляемых лесах. Однако после ураганов и пожаров количество *I. typographus* в неуправляемых лесах выросло до эпидемического уровня [39]. Большие заражения представляют угрозу для соседних насаждений на расстоянии до 500 м [41, 42]. Интенсивно управляемые естественные насаждения, прилегающие к лесным заповедникам, имеют повышенный риск заражения короедами [42]. Когда негативное воздействие погодных условий вызывает вспышку *I. typographus* в заповеднике, то он, скорее всего, также ослабляет соседние древостои. Получается, эти насаждения более восприимчивы к нападению и, вероятно, также способствовали развитию локальных популяций *I. typographus*.

В некоторых случаях (например, в национальном парке «Баварский лес» и в верхних Татрах) вокруг заповедников были созданы фитосанитарные защитные участки с градациями *I. typographus*. Контроль за жуками в этих буферных зонах оказался трудоемким из-за размера территории и продолжительных нападений короеда. На практике такие зоны между 100 и 1500 м от очага заражения [23] доказали свою эффективность и предотвратили значительные атаки в смежных управляемых лесах. Устойчивая стратегия снижения риска нападения *I. typographus* в хвойных лесах, за которыми осуществляются уходы, в долгосрочной перспективе заключается в сокращении доли ели и формировании неоднородных насаждений.

Оценка риска. С точки зрения управления лесным хозяйством, крайне важно оценить риск нападения *I. typographus*. Для этой цели были использованы различные подходы, включая анализ геопространственных данных и регрессионный анализ [26, 14, 23]. Ловушки с феромонами не являются надежным средством оценки риска, как и физиологические критерии на уровне одного дерева (состояние воды, питательные вещества, смола).

Обсуждения и заключение. Короед *I. typographus*, колонизируя ослабленные, слабые или мертвые деревья и таким образом начиная разложение коры и древесины, является неотъемлемым компонентом любой лесной экосистемы. Он использует недолговечные ресурсы и быстро размножается до чрезвычайно высоких чисел, например, после ветров. Когда ветровал слишком сухой для размножения, большие популяции вынуждены заражать живые и жизненно важные ели. В таких эпидемических ситуациях *I. typographus* может представлять серьезную угрозу для лесов, богатых елью, особенно для насаждений, произрастающих за пределами своего естественного ареала.

Большинство биологических характеристик *I. typographus* хорошо известны, за исключением таких, как поведение при зимовке. Несмотря на наличие у ученых этих знаний, динамика численности *I. typographus* далеко не до конца понятна и даже непредсказуема, что в значительной степени связано с неопределенностью погодных условий и природных явлений, таких как штормы, тайфуны или засуха. Сильные ветра в хвойных лесах почти неизбежно приводят к последующим вспышкам *I. typographus*. Популяции сначала развиваются в упавшей древесине, а затем жуки нападают на живые деревья вдоль соседних границ древостоев и в других местах.

Популяции *I. typographus* могут накапливаться не только в ветровалах, но и локально в пределах древостоя. Дальнейшее течение вспышки зависит от регулирующего воздействия естественных факторов и санитарных мер, а также от восприимчивости к вредителям оставшихся деревьев. Это, в свою очередь, зависит от погоды, поскольку засуха или ветер являются дополнительным стрессом для деревьев. В «нормальных» условиях вспышка обычно длится от трех до шести лет. В региональном масштабе пространственное развитие заражений может быть изучено с помощью анализа геопространственных данных и методов множественной регрессии в целях установления потенциальных корреляций между климатическими, специфическими, фитосанитарными факторами и динамикой заражения. Эти методы предоставляют ценные инструменты для оценки рисков, выявляя наиболее значимые движущие факторы, стоящие за вспышками. Представляется возможным контролировать некоторые из них с помощью управления лесами.

Существуют различные стратегии для минимизации потерь ели из-за нападения *I. typographus*. Применение феромонов и других полухимикатов считается одним из нескольких компонентов в интегрированном контроле. Феромонные ловушки могут быть полезны для защиты восприимчивых границ насаждений и для мониторинга. «Чистое управление» является самой старой и при этом наиболее эффективной стратегией. Во многих случаях ее действенность зависит от имеющихся ресурсов. По-прежнему необходимо разработать методы определения наименьшей единицы площади, которая позволит осуществлять качественный контроль и минимальные меры для обеспечения выполнения лесом своих функций.

В долгосрочной перспективе наиболее надежная и экологически обоснованная стратегия сдерживания вспышек *I. typographus* будет включать управление средой обитания, т. е. адаптацию к лесоводству. Ключевой вопрос – как уменьшить восприимчивость лесов и отдельных деревьев к короеду. Одним из способов является преобразование однородных еловых насаждений в более разнообразные экосистемы. Леса с неоднородным составом, возрастной структурой и наземной растительностью имеют различную физиологию и более устойчивы к атакам *I. typographus*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кобельков М.Е. Причины распространения очагов стволовых вредителей и меры по стабилизации санитарного и лесопатологического состояния лесов Московской области // Комплексные меры защиты ельников европейской части России по подавлению вспышки массового размножения короеда-типографа. Пушкино, 2001. С. 13–14.

Kobel'kov M.E. Reasons for the Distribution of Foci of Stem Pests and Measures for Stabilization of Sanitary and Forest Pathological Condition of Forests in the Moscow Region. *Comprehensive Protection Measures for Spruce Forests in the European Part of Russia to suppress the Outbreak of Mass Reproduction of the Bark Beetle*. Pushkino, 2001, pp. 13–14.

2. Кобельков М.Е. Проблема защиты еловых лесов от короёда типографа в Московской области // Лесн. хоз-во. 2003. № 1. С. 33.

Kobel'kov M.E. The Problem of Protecting Spruce Forests from the Bark Beetle in the Moscow Region. *Lesnoye khozyaystvo*, 2003, no. 1, p. 33.

3. Лебедева К.В., Вендило Н.В., Плетнев В.А. Феромоны в защите лесов от вредителей // Комплексные меры защиты ельников европейской части России по подавлению вспышки массового размножения короёда-типографа. Пушкино, 2001. С. 30–35.

Lebedeva K.V., Vendilo N.V., Pletnev V.A. Pheromones in Protection of Forests from Pests. *Comprehensive Protection Measures for Spruce Forests in the European Part of Russia to Suppress the Outbreak of Mass Reproduction of the Bark Beetle*. Pushkino, 2001, pp. 30–35.

4. Марченко Я.И. Феромонизация энтомониторинга в лесах Беларуси: результаты и их оценка // Леса Беларуси и их рациональное использование. Минск: БГТУ, 2000. С. 216–218.

Marchenko Ya.I. Pheromonization of Entomonitoring in the Forests of Belarus: Results and Their Assessment. *Forests of Belarus and Their Rational Use*. Minsk, BSTU Publ., 2000, pp. 216–218.

5. Маслов А.Д. Новая волна массового размножения короёда типографа в ельниках Восточной Европы // Лесн. хоз-во. 2003. № 1. С. 30–31.

Maslov A.D. A New Wave of Mass Reproduction of the Bark Beetle in Spruce Forests of Eastern Europe. *Lesnoye khozyaystvo*, 2003, no. 1, pp. 30–31.

6. Маслов А.Д. Влияние температуры и влажности на стволовых вредителей леса // Пушкино: ВНИИЛМ, 2008. 26 с.

Maslov A.D. *Influence of Temperature and Humidity on Forest Stem Pests*. Pushkino, VNIILM Publ., 2008. 26 p.

7. Скугравы В. Вспышки массового размножения короёда-типографа в Европе во второй половине XX в. // Лесохоз. информ. 2004. № 2. С. 48–58.

Skugrav V. Outbreaks of Mass Reproduction of the Bark Beetle in Europe in the Second Half of the XX Century. *Lesnoye khozyaystvo*, 2004, no. 2, pp. 48–58.

8. Anderbrant O., Schlyter F. Causes and Effects of Individual Quality in Bark Beetles. *Ecography*, 1989, vol. 12, iss. 4, pp. 488–493. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1989.tb00926.x>

9. Aukema B.H., Dahlsten D.L., Raffa K.F. Exploiting Behavioral Disparities among Predators and Prey to Selectively Remove Pests: Maximizing the Ratio of Bark Beetles to Predators Removed during Semiochemically Based Trap-out. *Environmental Entomology*, 2000, vol. 29, iss. 3, pp. 651–660.

10. Byers J.A. Effects of Attraction Radius and Flight Paths on Catch of Scolytid Beetles Dispersing Outward through Rings of Pheromone Traps. *Journal of Chemical Ecology*, 1999, vol. 25, iss. 5, pp. 985–1005. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020869422943>

11. Byers J.A. Wind-Aided Dispersal of Simulated Bark Beetles Flying through Forests. *Ecological Modelling*, 2000, vol. 125, iss. 2-3, pp. 231–243. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00187-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00187-8)

12. Byers J.A. Chemical Ecology of Bark Beetles in a Complex Olfactory Landscape. *Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis*. Ed. by F. Lieutier, K.R. Day, A. Battisti, J.-C. Grégoire, H.F. Evans. Dordrecht, Springer, 2004, pp. 89–134. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2241-8_8

13. Cochard H., Hölltä T., Herbette S., Delzon S., Mencuccini M. New Insights into the Mechanisms of Water-Stress-Induced Cavitation in Conifers. *Plant Physiology*, 2009, vol. 151, iss. 2, pp. 949–954. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.109.138305>

14. Coops N.C., Waring R.H., Wulder M.A., White J.C. Prediction and Assessment of Bark Beetle-Induced Mortality of Lodgepole Pine Using Estimates of Stand Vigor Derived from Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, iss. 5, pp. 1058–1066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.013>
15. Delplace D. *Etude de méthodes de détection de foyers de scolytes (Coleoptera, Curculionidae) dans l'est de la France. Comparaison de techniques d'inventaires au sol, de surveillance aéroportée et de télédétection aérienne et satellitaire*. Thèse. Belgique, Université Libre de Bruxelles, 2008. 150 p.
16. Erbilgin N., Krokene P., Kvamme T., Christiansen E. A Host Monoterpene Influences *Ips typographus* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) Responses to Its Aggregation Pheromone. *Agricultural and Forest Entomology*, 2007, vol. 9, iss. 2, pp. 135–140. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2007.00329.x>
17. Erbilgin N., Powell J.S., Raffa K.F. Effect of Varying Monoterpene Concentrations on the Response of *Ips pini* (Coleoptera: Scolytidae) to Its Aggregation Pheromone: Implications for Pest Management and Ecology of Bark Beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, 2003, vol. 5, iss. 4, pp. 269–274. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1461-9563.2003.00186.x>
18. Faccoli M. Effect of Weather on *Ips typographus* (Coleoptera Curculionidae) Phenology, Voltinism, and Associated Spruce Mortality in the Southeastern Alps. *Environmental Entomology*, 2009, vol. 38, iss. 2, pp. 307–316. DOI: <https://doi.org/10.1603/022.038.0202>
19. Faccoli M., Bernardinelli I. Breeding Performance of the Second Generation in Some Bivoltine Populations of *Ips typographus* (Coleoptera Curculionidae) in the South-Eastern Alps. *Journal of Pest Science*, 2011, vol. 84, iss. 1, pp. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10340-010-0320-7>
20. Fleischer P. Jr., Fleischer P., Ferenčík J., Hlaváč P., Kozánek M. Elevated Bark Temperature in Unremoved Stumps after Disturbances Facilitates Multi-Voltinism in *Ips typographus* Population in a Mountainous Forest. *Lesnícky časopis Forestry Journal*, 2016, vol. 62, pp. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.1515/forj-2016-0002>
21. Forsse E. Flight Propensity and Diapause Incidence in Five Populations of the Bark Beetle *Ips typographus* in Scandinavia. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1991, vol. 61, iss. 1, pp. 53–57. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1991.tb02395.x>
22. Gaylord M.L., Hofstetter R.W., Kolb T.E., Wagner M.R. Limited Response of Ponderosa Pine Bole Defenses to Wounding and Fungi. *Tree Physiology*, 2011, vol. 31, iss. 4, pp. 428–437. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr025>
23. Havašová M., Bucha T., Ferenčík J., Jakuš R. Applicability of a Vegetation Indices-Based Method to Map Bark Beetle Outbreaks in the High Tatra Mountains. *Annals of Forest Research*, 2015, vol. 58, iss. 2, pp. 295–310. DOI: <https://doi.org/10.15287/afr.2015.388>
24. Jakuš R. Bark Beetle (Coleoptera, Scolytidae) Outbreak and System of IPM Measures in an Area Affected by Intensive Forest Decline Connected with Honey Fungus (*Armillaria* sp.). *Anzeiger für Schädlingskunde*, 2002, vol. 74, iss. 2, pp. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1493-0280.2001.01008.x>
25. Jakuš R., Blaženc M. Influence of Proportion of (4S)-*cis*-verbenol in Pheromone Bait on *Ips typographus* (Col., Scolytidae) Catch in Pheromone Trap Barrier and in Single Traps. *Journal of Applied Entomology*, 2003, vol. 126, iss. 6, pp. 306–311. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1439-0418.2002.00659.x>
26. Jakuš R., Grodzki W., Ježík M., Jachym M. Definition of Spatial Patterns of Bark Beetle *Ips typographus* (L.) Outbreak Spreading in Tatra Mountains (Central Europe), Using GIS. *Proceedings: Ecology, Survey and Management of Forest Insects*. Ed. by M.L. McManus, A.M. Liebhold. Delaware, USDA Forest Service, 2003, pp. 25–43.
27. Komonen A., Schroeder M.L., Weslien J. *Ips typographus* Population Development after a Severe Storm in a Nature Reserve in Southern Sweden. *Journal of Applied Entomology*, 2011, vol. 135, iss. 1-2, pp. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2010.01520.x>

28. Lieutier F. Mechanisms of Resistance in Conifers and Bark Beetle Attack Strategies. *Mechanisms and Deployment of Resistance in Trees to Insects*. Ed. by M.R. Wagner, K.M. Clancy, F. Lieutier, T.D. Paine. Dordrecht, Springer, 2002, pp. 31–77. DOI: https://doi.org/10.1007/0-306-47596-0_2

29. Matthews B., Netherer S., Katzensteiner K., Pennerstorfer J., Blackwell E., Henschke P., Hietz P., Rosner S., Jansson P.-E., Schume H., Schopf A. Transpiration Deficits Increase Host Susceptibility to Bark Beetle Attack: Experimental Observations and Practical Outcomes for *Ips typographus* Hazard Assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 263, pp. 69–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.004>

30. Mezei P., Grodzki W., Blaženec M., Jakuš R. Factors Influencing the Wind-Bark Beetles' Disturbance System in the Course of an *Ips typographus* Outbreak in the Tatra Mountains. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 312, pp. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.020>

31. Modlinger R., Novotný P. Quantification of Time Delay between Damages Caused by Windstorms and by *Ips typographus*. *Lesnícky časopis Forestry Journal*, 2015, vol. 61(4), pp. 221–231. DOI: <https://doi.org/10.1515/forj-2015-0030>

32. Nikolov C., Konôpka B., Kajba M., Galko J., Kunca A., Janský L. Post-Disaster Forest Management and Bark Beetle Outbreak in Tatra National Park, Slovakia. *Mountain Research and Development*, 2014, vol. 34(4), pp. 326–335. DOI: <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-13-00017.1>

33. Pape J. Umweltschonendes Abschöpfen von Borkenka fern in der DDR. *Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge*, 1990, vol. 46, pp. 324–361.

34. Raffa K.F. Terpenes Tell Different Tales at Different Scales: Glimpses into the Chemical Ecology of Conifer – Bark Beetle – Microbial Interactions. *Journal of Chemical Ecology*, 2014, vol. 40, iss. 1, pp. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0368-y>

35. Raffa K.F., Andersson M.N., Schlyter F. Chapter One – Host Selection by Bark Beetles: Playing the Odds in a High-Stakes Game. *Advances in Insect Physiology*. Ed. by T. Claus, J.B. Gary. Academic Press, 2016, vol. 50, pp. 1–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.aiip.2016.02.001>

36. Raffa K.F., Aukema B.H., Bentz B.J., Carroll A.L., Hicke J.A., Turner M.G., Romme W.H. Cross-Scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. *BioScience*, 2008, vol. 58, iss. 6, pp. 501–517. DOI: <https://doi.org/10.1641/B580607>

37. Regnander W.J. The Influence of Natural Enemies on Brood Production in *Ips typographus* (Col.: Scolytidae) with Special Reference to Egg-Laying and Predation by *Thanasimus formicarius* (Col.: Cleridae). *Entomophaga*, 1992, vol. 37, pp. 333–342.

38. Schindler U., Durner W., von Unold G., Müller L. Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, vol. 74, iss. 4, pp. 1071–1083. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0358>

39. Schlyter F., Lundgren U. Distribution of a Bark Beetle and Its Predator within and outside Old Growth Forest Reserves: No Increase of Hazard Near Reserves. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1993, vol. 8, iss. 1-4, pp. 246–256. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827589309382774>

40. Schopf R., Köhler U. Untersuchungen zur Populationsdynamik der Fichtenborckenkäfer im Nationalpark Bayerischer Wald. *25 Jahre auf dem Weg zum Naturwald*. Neuschonau, Nationalpark Bayerischer Wald, 1999. pp. 88–111. Available at: https://www.nationalpark-bayerischer-wald.bayern.de/ueber_uns/geschichte/doc/25_jahre_auf_dem_weg_zum_naturwald.pdf (accessed 14.01.20).

41. Schröter H. Ausbreitung des Borkenkäferbefalls in Bannwäldern Baden-Württembergs. *Forstschutzprobleme in Nationalparks und Naturschutzgebieten*. Ed. by A. Wulf, K.H. Berendes. Berlin, Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 1999, H. 362, pp. 63–79.
42. Schröter H., Becher T., Delb H., Gehrke A., Metzler B. Waldschutzsituation 2001/2002 in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge*, 2002, B. 57, S. 330–332.
43. Sopow S.L., Bader M.K.-F., Brockerhoff E.G. Bark Beetles Attacking Conifer Seedlings: Picking on the Weakest or Feasting upon the Fittest? *Journal of Applied Ecology*, 2015, vol. 52, iss. 1, pp. 220–227. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12368>
44. Stadelmann G., Bugmann H., Wermelinger B., Meier F., Bigler C. A Predictive Framework to Assess Spatio-Temporal Variability of Infestations by the European Spruce Bark Beetle. *Ecography*, 2013, vol. 36, iss. 11, pp. 1208–1217. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00177.x>
45. Stenseth N.C., Kirkendall L.R. Population Dynamics of Bark Beetles, with Special Reference to *Ips typographus*: Introduction. *Ecography*, 1989, vol. 12, iss. 4, pp. 382–383. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1989.tb00912.x>
46. Sullivan B.T., Pettersson E.M., Seltmann K.C., Berisford C.W. Attraction of the Bark Beetle Parasitoid *Roptrocercus xylophagorum* (Hymenoptera: Pteromalidae) to Host-Associated Olfactory Cues. *Environmental Entomology*, 2000, vol. 29, no. 6, pp. 1136–1151.
47. Temperli C., Bugmann H., Elkin C. Cross-Scale Interactions among Bark Beetles, Climate Change, and Wind Disturbances: A Landscape Modeling Approach. *Ecological Monographs*, 2013, vol. 83, iss. 3, pp. 383–402. DOI: <https://doi.org/10.1890/12-1503.1>
48. Thom D., Seidl R. Natural Disturbance Impacts on Ecosystem Services and Biodiversity in Temperate and Boreal Forests. *Biological Reviews*, 2016, vol. 91, iss. 3, pp. 760–781. DOI: <https://doi.org/10.1111/brv.12193>
49. Wermelinger B. Development and Distribution of Predators and Parasitoids during Two Consecutive Years of an *Ips typographus* (Col., Scolytidae) Infestation. *Journal of Applied Entomology*, 2002, vol. 126, iss. 10, pp. 521–527. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1439-0418.2002.00707.x>
50. 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: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.018>
51. Wermelinger B., Seifert M. Temperature-Dependent Reproduction of the Spruce Bark Beetle *Ips typographus*, and Analysis of the Potential Population Growth. *Ecological Entomology*, 1999, vol. 24, iss. 1, pp. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2311.1999.00175.x>
52. Weslien J. Interactions within and between Species at Different Densities of the Bark Beetle *Ips typographus* and Its Predator *Thanasimus formicarius*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1994, vol. 71, iss. 2, pp. 133–143. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1994.tb01779.x>
53. Weslien J., Schroeder L.M. Population Levels of Bark Beetles and Associated Insects in Managed and Unmanaged Spruce Stands. *Forest Ecology and Management*, 1999, vol. 115, iss. 2-3, pp. 267–275. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00405-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00405-8)
54. Wichmann L., Ravn H.P. The Spread of *Ips typographus* (L.) (Coleoptera, Scolytidae) Attacks Following Heavy Windthrow in Denmark, Analysed Using GIS. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 148, iss. 1-3, pp. 31–39. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00477-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00477-1)
55. Zumr V. Dispersal of the Spruce Bark Beetle *Ips typographus* (L.) in Spruce Woods. *Journal of Applied Entomology*, 1992, vol. 114, iss. 1-5, pp. 348–322. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1992.tb01138.x>

PROTECTION OF SPRUCE FORESTS FROM OUTBREAKS OF *Ips typographus* (REVIEW)

Nana R. Pirtskhalava-Karpova¹, Engineer; ResearcherID: [AAB-1262-2020](https://orcid.org/0000-0002-9527-4631),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-4631>

Aleksandr A. Karpov¹, Deputy Director for Territory Protection and Environmental Safety;

ResearcherID: [H-1915-2019](https://orcid.org/0000-0002-9087-8399), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9087-8399>

Evgeniy E. Kozlovski¹, Deputy Director for Scientific Work; ResearcherID: [AAB-1558-2020](https://orcid.org/0000-0003-4785-898X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4785-898X>

Mikhail Yu. Grishchenko^{1,2,3}, Candidate of Geography, Senior Research Scientist, Engineer, Assoc. Prof.; ResearcherID: [L-9961-2015](https://orcid.org/0000-0003-3223-7697), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3223-7697>

¹State Nature Reserve Kurilskiy, ul. Zarechnaya, 5, pgt Yuzhno-Kurilsk, Sakhalin Region, 694500, Russian Federation; e-mail: heyнанabl@gmail.com, kurilskiy@mail.ru, lesnoy.monitoring@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russian Federation; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

³National Research University Higher School of Economics, Pokrovskiy b-r, 11, Moscow, 109028, Russian Federation

Abstract. Outbreaks of *Ips typographus* (L.) caused by catastrophic natural phenomena in Central Europe, Siberia and the Far East have been the subject of numerous scientific studies. Molecular methods were used to analyze the relationships and origin of *Ips* species. The review article shows in detail the biological characteristics of *I. typographus*, such as the effect of temperature on vital parameters and flight behavior. It was found that the spruce bark beetle disperses within 500 m. However, new attacks occur in the immediate vicinity of the old foci. The susceptibility and protection mechanisms of trees are critical to a successful bark beetle attack. The newly attacked trees react with preformed resin, reactions to wounds, and, ultimately, systemic changes in physiology. The risk assessment in the studies was carried out both at the tree level and at the forest level as a whole. The risk of an attack of *I. typographus* is associated with the growth of the forest in a particular area, age, the flow of nutrients and water to the tree. The dynamics of outbreaks, to a large extent, depend on the abundance of *I. typographus*, susceptibility of trees, weather conditions and phytosanitary measures. Bark beetle *I. typographus* is an integral component of any forest ecosystem. It colonizes weakened, weak or dead trees, and thus begins the decomposition of bark and wood. This pest is able to use short-lived resources and quickly multiply to extremely large numbers, for example, after winds. In such epidemic situations, *I. typographus* can pose a serious threat to spruce-rich forests, especially for stands planted outside their optimal range. The spatial development of *I. typographus* infections can be analyzed using GIS and multiple regression methods to investigate potential correlations between climatic, specific and phytosanitary factors and infection dynamics. Also, the article discusses various methods of forest control and emphasizes the need for more sophisticated risk assessment tools.

For citation: Pirtskhalava-Karpova N.R., Karpov A.A., Kozlovski E.E., Grishchenko M.Yu. Protection of Spruce Forests from Outbreaks of *Ips typographus* (Review). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 55–67. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-55-67

Keywords: *Ips typographus*, forest ecosystem, ecology, forest management, spruce forests.

УДК 630*232.311.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-68-79

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПЛЮСОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ ДУБА

В.А. Кострикин, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [U-2449-2019](https://orcid.org/0000-0003-1939-4743)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1939-4743>

В.К. Ширнин, д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [U-1932-2019](https://orcid.org/0000-0003-2614-3416)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2614-3416>

С.А. Крюкова, мл. науч. сотр., аспирант; ResearcherID: [F-6016-2019](https://orcid.org/0000-0002-3648-6845)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3648-6845>

Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: ilgis@lesgen.vrn.ru, v.kostrikin2015@yandex.ru

Аннотация. В Воронежской области доля семенных насаждений составляет менее половины площади дубрав. На фоне этого главной задачей становится воспроизводство лесов семенного происхождения, где семена для создания культур будут иметь более хорошие наследственные свойства. При производстве семян улучшенных селекционных категорий важное место занимают плюсовые насаждения. В них, если удалены минусовые деревья, получают улучшенные семена. Постоянные лесосеменные участки, заложенные потомством плюсовых насаждений, имеют семена этой же селекционной категории. Действующие нормативные и правовые документы по выделению плюсовых насаждений не дают конкретных рекомендаций. Для установления критериев, по которым определяются насаждения данной категории, нами обследованы в Воронежской области все лучшие («кандидаты в плюсовые») древостои, в которых растут плюсовые деревья. Частота их встречаемости в таксационных выделах изменяется в широких пределах – 2...10 дер./10 га насаждений. Средняя встречаемость охарактеризована нами как минимальная при отнесении насаждения к категории плюсовых. Плюсовые насаждения рекомендуется выделять по материалам селекционной инвентаризации независимо от времени проведения лесоустроительных работ. Выполнена детальная таксация такого насаждения в квартале 41 Красного участкового лесничества Воронцовского лесничества на площади 10,7 га. Исследование проводилось на 10 пробных площадках (каждая по 1 га), где осуществлена селекционная инвентаризация, а также учет деревьев по технической годности с детальным описанием каждого экземпляра дуба по таксационным признакам, состоянию и наличию пороков. Материалы селекционной инвентаризации с выделением «хороших деревьев» (сумма плюсовых и нормально-лучших) коррелируют с распределением деревьев по категориям технической годности. Выявленные закономерности можно использовать при селекционной инвентаризации дубовых насаждений. Их рекомендуется относить к категории плюсовых при наличии в древостое (при полноте 0,7–0,9) более 35 % деловых стволов и произрастании на таксационном выделе не менее 1 плюсового дерева на 2 га. Восстановление дубрав желудями, собранными в плюсовых насаждениях, повысит качество лесных культур.
Для цитирования: Кострикин В.А., Ширнин В.К., Крюкова С.А. Критерии оценки плюсовых насаждений дуба // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 68–79. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-68-79

Ключевые слова: дуб, плюсовые насаждения, селекционная инвентаризация, категории технической годности деревьев.

Введение

Дуб черешчатый является главной лесообразующей породой в Центральном Черноземье, где он занимает от 18 (Тамбовская область) до 80 % (Белгородская область) лесопокрытой площади.

На протяжении многих веков дубравы на Русской равнине интенсивно эксплуатировались, а восстановление всегда протекало очень сложно, с большими ошибками и экономическими потерями. Поэтому главной задачей является восстановление данных насаждений семенным материалом более высокой селекционной категории [6, 20]. Для этого необходимо выделить и сохранить лучший генофонд, а также создать объекты лесного семеноводства [8, 19, 22].

Исследование посвящено методике выделения плюсовых насаждений. Четких рекомендаций по осуществлению данных работ не существует. Обычно ссылаются на М.М. Вересина [1], который выделяет 3 группы лесных насаждений (табл. 1).

В табл. 1 показано процентное участие плюсовых, лучших и минусовых деревьев в древостое. Для нахождения группы необходимо определить полноту главного яруса и процент минусовых деревьев, а затем по таблице выявить селекционную категорию насаждения.

Таблица 1

Селекционная характеристика [1] насаждений для европейской части России

Насаждение	Показатель	Доля деревьев, % для каждой категории, при полноте					
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Минусовое	Плохие деревья (минусовые)	> 75	> 70	> 65	> 60	> 55	> 50
Плюсовое	Плохие деревья (минусовые)	< 50	< 40	< 30	< 20	< 10	Единичные
	Хорошие деревья (плюсовые и лучшие нормальные)	> 15	> 18	> 21	> 24	> 27	> 30

Примечание: Все насаждения, не подходящие по показателям к минусовым или плюсовым, относятся к нормальным; нормально-лучшие – это хорошие деревья, более сильного роста и неплохого качества, диаметр которых превышает средний диаметр дерева в насаждении на 15–20 %.

С.С. Пятницкий [13] считал, что в состав плюсовых насаждений должно входить более 75 % хорошо сформировавшихся, мощных стволов при отсутствии у них болезней и вредителей. Ученый выделял 3 группы насаждений: 50...75 % – плюсовое; 25...50 % – нормальное; меньше 25 % – минусовое.

В предложениях по выделению таксационных признаков есть термины, которые по детализации селекционных категорий не совпадают с применяемыми в действующей нормативной и правовой литературе и при этом сложны в практическом использовании. В связи с этим цель работы заключается в оптимизации критериев отбора плюсовых насаждений дуба черешчатого.

Объекты и методы исследования

Площадь плюсовых насаждений дуба черешчатого невелика: всего в России имеется 1,5 тыс. га [16], в регионах Центрального Черноземья – 104 га [18] (табл. 2, рис. 1), или 0,015 % от лесопокрытой площади дубрав.

Таблица 2

Плюсовые насаждения в регионах Центрального Черноземья России

Область	Лесничество участковое лесничество	Квартал	Площадь, га	Возраст, лет	Бонитет
Белгородская	Алексеевское Городищенское	61, 62	45	145	I ^a
Воронежская	Воронцовское Красное	41	11	135	I
Курская	Рыльское Крупецкое	20	13	100	I ^a
	Льговское Банищенское	45	6	80	I
Липецкая	Елецкое Марьинское	80	17	90	I
Тамбовская	Кирсановское Кирсановское	177	12	85	I,5
<i>Итого</i>			104		

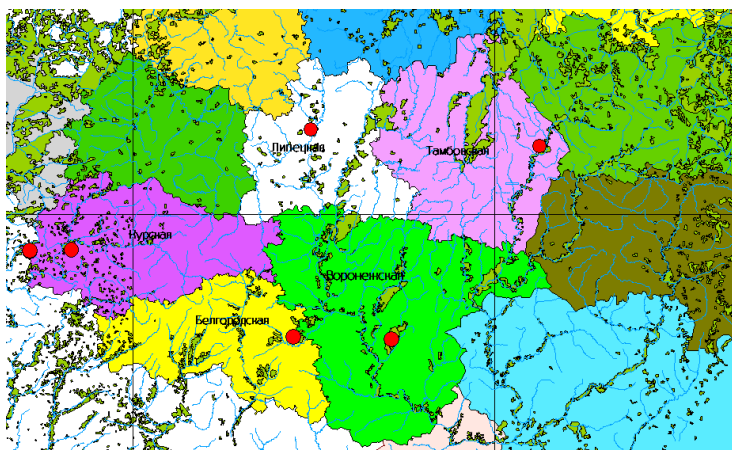


Рис. 1. Местонахождение плюсовых насаждений дуба в Центральном Черноземье России

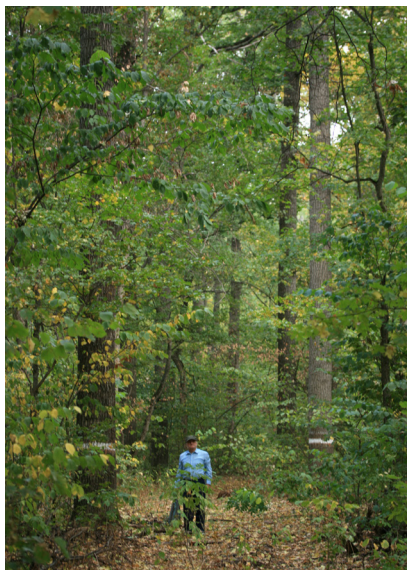
Fig. 1. The location of the oak plus stands in the Central Chernozem Region

Плюсовые насаждения – это высококачественные и высокопродуктивные для данных лесорастительных условий насаждения (рис. 2) [9], хранители ценного генофонда дуба [16, 21].

Объектами исследования стали лучшие древостои дуба (70 таксационных выделов общей площадью 500 га) естественного происхождения, в которых проводится селекционная работа по сохранению генофонда и созданию

Рис. 2. Плюсоев насаждение дуба черешчатого в Воронцовском лесничестве Воронежской области

Fig. 2. A plus stand of pedunculate oak in the Vorontsovskoye forestry area of the Voronezh region



постоянной лесосеменной базы. Основные мероприятия по селекционной инвентаризации проведены в расположенных на выровненном рельефе в нагорных дубравах Шипова леса возрастом около 140–160 лет с преобладанием позднораспускающейся формы изучаемого вида, в типе леса – дубрава снытьевая, тип лесорастительных условий – свежая дубрава (D_2).

Дубовые насаждения объединены нами в следующие группы: плюсовые деревья, нормально-лучшие, нормальные, минусовые [1, 2, 5, 10, 14, 15, 17]. При этом для 1, 3 и 4-й групп использованы критерии [9]. Кроме этого была выделена дополнительная (не указанная в [9]) селекционная группа деревьев – нормально-лучшие, деревья, имеющие сильный рост и хорошее качество ствола, но с меньшим, чем плюсовые, превышением среднего диаметра дерева в насаждении.

Все дубы были подписаны и занесены в тетрадь наблюдений, что позволило в последующем уточнять некоторые их дополнительные параметры и характеристики. Местонахождение каждого плюсового дерева зафиксировано навигатором.

Параллельно с проведением селекционной инвентаризации выполнялось классифицирование стволов по категориям технической годности. В категорию деловых отнесены особи с длиной деловой части более 6,5 м; к полуделовым – 2,0–6,5 м; к дровяным – менее 2,0 м в комлевой половине ствола [3, 10].

Результаты исследования и их обсуждение

При наличии плюсовых деревьев насаждение относится к плюсовым. Селекционеры [5] считают, что при наличии 5 (10) плюсовых деревьев сосны обыкновенной на 1 га насаждение можно рассматривать как «кандидат в плюсовое». Подобных сведений о древостоях дуба в опубликованной литературе не приводится. При обследовании 70 таксационных выделов в лесничествах Воронежской области, где произрастает 182 плюсовых дерева, выяснилось следующее: среднее количество плюсовых деревьев на 10 га выдела составляет 6 деревьев ($0,6 \pm 0,10/1$ га) при варьировании 1...10 шт. (рис. 3).

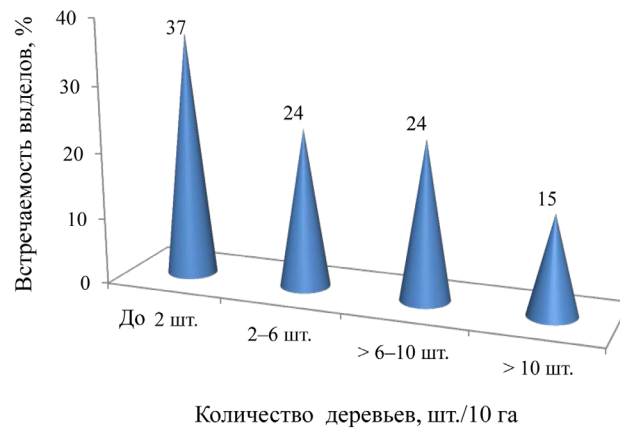


Рис. 3. Распределение количества плюсовых деревьев на единицу площади выдела

Fig. 3. The distribution of the number of plus trees per unit area of an allotment

Редко встречаются насаждения с 2 и более плюсовыми деревьями на каждый гектар таксационного выдела. Исходя из принципа, что в плюсовом насаждении должно быть повышенное количество плюсовых деревьев и учитывая частоту их встречаемости в природных условиях, предлагаем установить минимум – 1 дер./2 га насаждения (определяется средней встречаемостью экземпляров этой категории в древостоях).

При детальном селекционном обследовании плюсового насаждения в квартале 41 Красного участкового лесничества всего зафиксировано 863 сырораствующих ствола дуба, что в среднем составляет 81 дер./1 га (табл. 3). В плюсовом насаждении произрастает 21 плюсовое, 687 нормальных (по [9]) и 155 минусовых деревьев.

Таблица 3

**Результаты сплошного перече́та по породам на учетных площадях
Красного участкового лесничества, квартал 41**

Порода	Количество деревьев, шт., на пробных площадях										Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Дуб	84	108	102	103	129	90	75	104	42	27	863
Ясень	7	13	6	27	17	34	28	58	8	31	229
Липа	47	71	60	91	66	76	81	–	20	45	617
Клен остролистный	100	110	112	163	71	116	61	87	30	50	900
Клен полевой	24	46	37	43	53	64	64	113	70	27	541
Ильм	33	3	10	8	23	38	17	33	18	13	196
<i>Итого</i>	295	351	327	435	359	418	326	395	188	193	3346

На всем участке отмечено: 8 деревьев, поврежденных грибами (трутовики), 8 усыхающих (сухие сучья в кроне), 4 с повреждениями молнией, 3 с механическими повреждениями коры, 3 с дуплами, 5 с надломовидным раком и 5 с муфтообразными наплывами. Всего насчитывается 36 (4,1 % от общего количества экземпляров в насаждении) деревьев дуба с пороками, средневзвешенный балл санитарного состояния древостоя не превышает 1,5, что подтверждает

здоровое состояние насаждения [6, 12]. Сухостойные деревья подготовлены к санитарной рубке.

Собранный материал свидетельствует, как о существенных различиях между учетными пробными площадями (по числу стволов, наличию хороших деревьев), так и об очень близких характеристиках по диаметру главной и сопутствующей пород (табл. 4).

Таблица 4

**Характеристика пробных площадей по диаметру и запасу древесных пород
в Красном участковом лесничестве, квартал 41**

№ пробной площади	Дуб		Ясень		Липа		Клен остролистный		Общий запас, м ³
	диаметр, см	запас, м ³	диаметр, см	запас, м ³	диаметр, см	запас, м ³	диаметр, см	запас, м ³	
1	57,9	295,2	55,3	21,4	30,3	37,7	25,4	87,3	441,6
2	56,3	356,3	48,2	29,7	28,3	48,6	26,1	73,7	508,3
3	54,5	301,6	41,9	10,0	29,5	45,1	24,3	56,5	413,2
4	56,9	332,5	47,8	59,3	30,0	70,0	26,6	101,8	563,6
5	52,2	347,0	46,5	35,0	28,6	45,2	26,5	44,4	471,6
6	55,9	276,1	46,9	70,3	29,5	56,0	28,5	84,2	486,6
7	54,8	226,2	41,8	61,5	32,3	72,3	28,6	45,2	405,2
8	53,8	297,3	46,6	121,2	33,6	59,0	29,7	68,5	546,0
9	55,7	129,1	49,0	18,2	31,2	16,1	29,8	24,3	187,7
10	55,3	81,8	49,2	72,5	31,0	36,9	30,6	43,6	234,8
<i>Итого</i>	55,2	2643,0	47,3	499,2	30,4	486,9	27,6	629,5	4258,6

Состав насаждений первого яруса по запасу составляет – 7Д1Яс1Лп1Кл.о, ед. Ил. На 1 га – 408,6 м³, в том числе дуба – 247,0 м³. Второй ярус выражен слабо и имеет состав – 7Кл.о3Лп+Кл.п. Преобладающая полнота с учетом сопутствующих пород 0,7–0,9. В исследуемом насаждении преобладают нормальные деревья (табл. 5).

Имеется 21 плюсовое дерево (2 дер./1 га), что встречается в изученных дубравах очень редко. Размещение экземпляров неравномерное (на 2 пробных площадях плюсовых деревьев нет). Средний диаметр – 61 см (минимальный – 50 см, максимальный – 76 см), длина деловой части – 13...17 м, объем ствола – 4,19 м³ при лимите 2,70–6,50 м³.

Одной из целей подеревной таксации являлось дополнительное выделение лучшего генофонда в виде «кандидатов» в новые семенные деревья (табл. 6). Всего было отобрано 60 особей – кандидатов в плюсовые – по следующим критериям: санитарное состояние, механические и экологические повреждения, количество водяных побегов, прямизна ствола, протяженность кроны, длина деловой части. На каждое дерево составлен паспорт предварительного отбора плюсовых деревьев.

Таблица 5

Количество деревьев дуба разных селекционных категорий на пробных площадях Красного участкового лесничества, квартал 41

№ пробной площади	Выделенные группы, шт.				Итого
	плюсовые	нормально-лучшие	нормальные	минусовые	
1	2	34	32	16	84
2	5	42	29	32	108
3	3	30	43	26	102
4	2	44	43	13	102
5	3	46	51	29	129
6	1	26	48	15	90
7	4	35	33	3	75
8	1	48	43	12	104
9	–	18	18	6	42
10	–	11	13	3	27
<i>Итого (%)</i>	21 (2,4)	334 (38,7)	353 (40,9)	155 (18,0)	863 (100)

Таблица 6

Характеристика категории «кандидаты в плюсовые» Красного участкового лесничества, квартал 41

№ пробной площади	Количество деревьев, шт.	Диаметр (D), см	Длина деловой части (L), м	Объем ствола (V), м ³	Превышение средних значений по пробной площади, %		
					D	L	V
1	11	61,2	14,1	4,5	14,8	87,9	20,6
2	9	62,6	12,8	4,4	15,4	70,4	23,7
3	11	65,1	11,5	4,9	20,1	53,9	45,2
4	6	65,8	10,7	5,0	21,5	42,2	35,5
5	9	59,3	12,3	3,1	9,6	64,4	26,3
6	3	64,2	11,7	4,7	18,5	55,5	36,2
7	6	61,6	10,8	4,39	13,6	44,3	35,1
8	5	62,2	11,4	4,2	11,0	52,0	34,0
<i>Среднее</i>	60	62,8	11,9	4,4	15,6	58,8	32,1

В изученных нами насаждениях обнаружена взаимосвязь количества деревьев «хороших» селекционных категорий и технической категории годности (деловые). Коэффициент корреляции, вычисленный в программе Statistica равен 0,95 при $p < 0,05$, показатель рангового коэффициента Спирмена – 0,84 при том же уровне значимости (табл. 7). Статистически соотносимы количества плюсовых и деловых деревьев – 0,68 при уровне значимости $p < 0,05$. Зависимость выражается полиномиальной кривой при $R^2 = 0,49$ (рис. 4).

Таблица 7

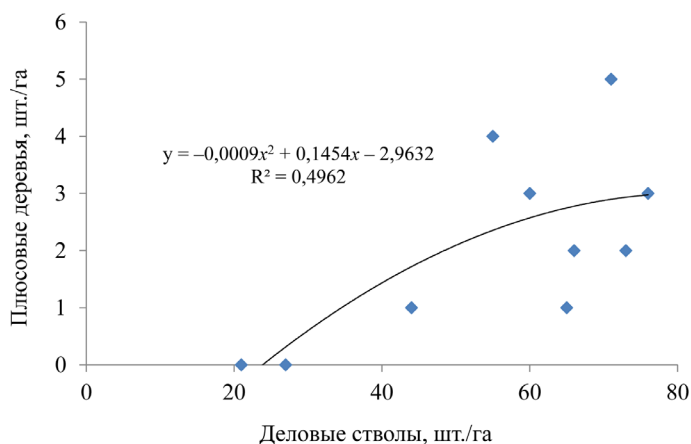
Сравнительная оценка распределения деревьев дуба на пробных площадях по данным селекционной инвентаризации и по технической годности

№ пробной площади	Хорошие деревья			Категория «деловые стволы»			Сравнительная оценка по коэффициенту Спирмена [4]	
	шт.	%	ранг	шт.	%	ранг	d*	d ²
1	36	44,0	7	66	74,2	9	2	4
2	47	41,2	5	71	62,3	4	1	1
3	33	32,0	2	60	57,7	2	0	0
4	46	44,7	8	73	70,9	7	1	1
5	49	37,4	3	76	58,0	3	0	0
6	27	30,0	1	44	48,9	1	0	0
7	39	51,3	10	55	72,4	8	2	4
8	49	47,1	9	65	62,5	5	4	16
9	18	42,9	6	27	64,3	6	0	0
10	11	40,7	4	21	74,8	10	6	36
<i>Всего</i>	355			558				62

*Разница в рангах частот рядов распределения.

Рис. 4. Взаимосвязь количества плюсовых деревьев и деловых стволов

Fig. 4. The relationship between the number of plus trees and commercial stems



При принятом нами нижнем пороге плюсовых деревьев 1 дер./2 га, согласно уравнению (рис. 4), деловых стволов (при полноте 0,7–0,9) должно быть 30 шт., или 35 % от общего количества, т. к. на пробной площади (1 га) в среднем растет 81 дерево. Следовательно, одним из критериев отбора плюсовых насаждений может быть доля деловых деревьев в древостое в количестве не менее 35 %.

На выделенное плюсовое насаждение оформляется паспорт, в котором приводится схема местонахождения участка. При оформлении паспорта требуется соблюдение порядка выделения объектов семеноводства. Оно, согласно статье 63 Правил [9], выполняется в ходе лесоустройства. Данное требование

ограничивает процесс нахождения границ плюсового насаждения по времени и составу исполнителей. Необходима корректировка этого положения Правил.

Плюсовые насаждения – лучшие по продуктивности и устойчивости древостои. Собранные в них желуди используются для создания постоянных участков, продуцирующих улучшенные семена [11, 23, 24]. Такой способ производства селекционных семян является наиболее перспективным, позволяющим сохранить генетическое разнообразие.

В первую очередь в эту категорию должны войти древостои, в которых уже отобраны и аттестованы плюсовые деревья.

Выводы

1. Последняя селекционная инвентаризация показала, что в пяти областях Центрального Черноземья выделено всего 104 га плюсовых насаждений. Для развития семеноводства и сохранения генофонда дуба необходимо дополнительное выделение таких площадей.

2. Предлагаются следующие критерии для отбора плюсовых насаждений в приспевающих и спелых древостоях при полноте 0,7 и выше:

наличие не менее одного плюсового дерева на 2 га лесного участка;

доля деловых деревьев более 35 %;

здоровое санитарное состояние насаждения;

соответствие бонитета древостоя лесорастительным условиям произрастания.

3. Объекты лесного семеноводства следует выделять не только в ходе лесоустройства, но и при проведении селекционной инвентаризации и после аттестации постоянно действующей комиссией с занесением деревьев в существующую базу.

4. Семена, собранные в плюсовом насаждении без удаления минусовых деревьев, целесообразно относить к улучшенным, т. к. согласно «Порядку производства семян отдельных категорий лесных растений» желуди с дубов (на постоянном лесосеменном участке), созданных семенами, заготовленными в плюсовых насаждениях (без указания на вырубку минусовых деревьев), относятся к категории улучшенных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вересин М.М. Лесное семеноводство. М.: Гослесбумиздат, 1963. 158 с.
Veresin M.M. *Forest Seed Production*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 158 p.
2. Вересин М.М., Ефимов Ю.П., Арефьев Ю.Ф. Справочник по лесному селекционному семеноводству. М.: Агропромиздат, 1985. 245 с.
Veresin M.M., Efimov Yu.P., Aref'ev Yu.F. *Handbook on Forest Seed Breeding*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 245 p.
3. Верхунов П.М., Черных В.Л. Таксация леса. Йошкар-Ола: Марийский гос. техн. ун-т, 2007. 396 с.
Verkhunov P.M., Chernykh V.L. *Forest Inventory*. Yoshkar-Ola, MarSU Publ., 2007. 396 p.
4. Лакин Г.Ф. Биометрия. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1980. 293 с.
Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 293 p.
5. Лаур Н.В., Царев А.П. Отбор плюсовых деревьев и насаждений. Петрозаводск: ПетрГУ, 2005. 36 с.
Laur N.V., Tsarev A.P. *Selection of Plus Trees and Stands*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2005. 36 p.

6. Лесной кодекс Российской Федерации: Федер. закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ: [с учетом изм., внесенных Федер. законом от 19.07.2018 года № 212-ФЗ] // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2006. Вып. 50, Ст. 5278.

Forest Code of the Russian Federation: The Federal Law of December 4, 2006 No. 200-FZ. *Corpus of Legislation of the Russian Federation*, 2006, no. 50, art. 5278.

7. Постановление Правительства РФ от 20.05.2017 № 607 «О Правилах санитарной безопасности в лесах» // Официальный интернет-портал правовой информации. Дата опубликования: 29.05.2017. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru> (дата обращения: 20.10.2019).

Decree of the Government of the Russian Federation of May 20, 2017 No. 607 “On the Rules of Sanitary Safety in Forests”. *The Official Internet-Portal of Legal Information*. Moscow, 2017.

8. Привалов Ф.И., Кильчевский А.В., Гриб С.И., Решетников В.Н., Козловская З.А., Дмитриева С.А., Ковалевич А.И., Матыс И.С. Генетические ресурсы растений Республики Беларусь – первооснова продовольственной, природоохранной и биологической безопасности страны / Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя аграрных навук. 2018. Т. 56, № 3. С. 304–320.

Privalov F.I., Kilchevskij A.V., Grib S.I., Reshetnikov V.N., Kozlovskaja Z.A., Dmitrieva S.A., Kovalevich A.I., Matys I.S. Plants Genetic Resources in the Republic of Belarus – the Fundamental Principle of Food, Environmental and Biological Security of the Country. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series], 2018, vol. 56, no 3, pp. 304–320. DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2018-56-3-304-320>

9. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 20.10.2015 № 438 «Об утверждении Правил создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов)»: зарегистрировано в Минюсте России 12.02.2016 № 41078 // Официальный интернет-портал правовой информации. Дата опубликования: 17.02.2016. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru> (дата обращения: 10.02.2019).

Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation of October 20, 2015 No. 438 “On Approval of the Rules for Creation and Allocation of Forest Seed Production Facilities (Forest Seed Plantations, Permanent Forest Seed Plots and Similar Facilities)”: Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on February 12, 2016 No. 41078. *The Official Internet-Portal of Legal Information*. Moscow, 2016.

10. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 10.11.2011 № 472 «Об утверждении Методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов»: на 15.03.2018. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902325555> (дата обращения: 20.10.2019).

Order of the Federal Forestry Agency of November 10, 2011 No. 472 “On Approval of Methodical Recommendations for the State Forest Inventory”.

11. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 10.01.2012 № 3 «Об утверждении Порядка производства семян отдельных категорий лесных растений»: зарегистрировано в Минюсте РФ 20.02.2012 № 23270; опубликовано в «Бюллетене нормативных актов федеральных органов исполнительной власти», № 15, 09.04.2012. Режим доступа: <https://minjust.consultant.ru/documents/1284#> (дата обращения: 20.10.2019).

Order of the Federal Forestry Agency of January 10, 2012 No. 3 “On Approval of the Procedure for Seed Production for Different Categories of Forest Species”: Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on February 20, 2012 No. 23270.

12. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 09.06.2015. № 182 «Об утверждении методического документа по обеспечению санитарной безопасности в лесах»: зарегистрировано в Минюсте РФ 14.12.2015. № 40084. <https://minjust.consultant.ru/documents/17253>

Order of the Federal Forestry Agency of June 9, 2015 No. 182 "On Approval of the Methodical Document Ensuring Sanitary Safety in Forests": Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on December 14, 2015 No. 40084.

13. Пятницкий С.С. Организация элитного семеноводства лесных древесных пород // Лесовозобновление и лесоразведение. Киев: Урожай, 1964. Т. 155. С. 81–93.

Ryatskiy S.S. Management of Elite Seed Production of Forest Tree Species. *Lesovozobnovleniye i lesorazvedeniye*, 1964, vol. 155, pp. 81–93.

14. Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации: утв. Рослесхозом 11.01.2000. М.: ВНИИЦлесресурс, 198 с.

Instructions for Forest Seed Production in the Russian Federation: Approved by the Federal Forestry Agency on January 11, 2000. Moscow, VNIITslesresurs Publ., 2000. 198 p.

15. Указания по разработке проектов организации объектов постоянной лесосеменной базы на селекционной основе: утв. Гос. ком. СССР по лесн. хоз-ву 17.04.85. М.: ЦБНТИлесхоза, 1986. 227 с.

Guidelines for the Development of Projects on the Organization of Permanent Forest Seed Base on the Basis of Selection: Approved by the State Committee of the USSR on Forestry on April 17, 1985. Moscow, TsBNTIleskhoza Publ., 1986. 227 p.

16. Царев А.П., Лаур Н.В. Лесные плюсовые насаждения и критерии их отбора // Бюл. ГНБС. 2019. Вып. 132. С. 79–86.

Tsarev A.P., Laur N.V. Forest Plus Stands and Criteria for Their Selection. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden], 2019, iss. 132, pp. 79–86. DOI: [10.25684/NBG.boolt.132.2019.10](https://doi.org/10.25684/NBG.boolt.132.2019.10)

17. Ширнин В.К., Ширнина Л.В. Рекомендации по отбору плюсовых деревьев дуба черешчатого в пойменных дубравах ЦЧО. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2004. 15 с.

Shirnin V.K., Shirnina L.V. *Recommendations on the Selection of Plus Trees of Pedunculate Oak in Alluvial Oak Forests of the Central Chernozem Region*. Voronezh, VSU Publ., 2004. 15 p.

18. Ширнин В.К., Кострикин В.А., Ширнина Л.В., Благодарова Т.А., Крюкова С.А., Целиков М.Е. Объекты селекционного семеноводства дуба в ЦЧР: моногр. Воронеж: Полигр. решения, 2018, 196 с.

Shirnin V.K., Kostrikin V.A., Shirnina L.V., Blagodarova T.A., Kryukova S.A., Tselikov M.E. *Objects of Selective Oak Seed Production in the Central Chernozem Region*: Monograph. Voronezh, Poligraficheskiye resheniya Publ., 2018. 196 p.

19. Ballian D., Memišević M., Bogunić F., Bašić N., Marković M., Kajba D. Morphological Variability of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) in the Region of Croatia and Western Balkans. *Šumarski List*, 2010, vol. 134, no. 7-8, pp. 371–386.

20. Barzdajn W., Bruder M. Tree Testing and Estimation of Heritability Using the Pedunculate Oak *Quercus robur* L. Seed Orchard in the Krotoszyn Forest District. *Leśne Prace Badawcze* [Forest Research Papers], 2018, vol. 79, iss. 4, pp. 309–315. DOI: <https://doi.org/10.2478/frp-2018-0031>

21. Bogdan I.K., Kajba D., Šatović Z., Schüler S., Bogdan S. Genetic Diversity of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) in Clonal Seed Orchards in Croatia, Assessed by Nuclear and Chloroplast Microsatellites. *South-East European Forestry*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 29–46. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefer.18-09>

22. Lindquist B. *Forstgenetik in der schwedischen Waldbaupraxis*. Radebene und Berlin, Neumann Verlag, 1954. 156 S.

23. Mirzaie-Nodoushan H., Hosseinzadeh J., Pourhashemi M., Mehrpur Sh., Hamzehpour M., Abravesh Z. Heritability and Growth Analysis of Brant's Oak (*Quercus brantii* Lindl.) Based on Sapling Characteristics. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 215–227. DOI: <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2018.116750>

24. Vranckx G., Jacquemyn H., Mergeay J., Cox K., Kint V., Muys B., Honnay O. Transmission of Genetic Variation from the Adult Generation to Naturally Established Seedling Cohorts in Small Forest Stands of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 312, pp. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.027>

CRITERIA FOR ASSESSMENT OF PLUS OAK STANDS

Viktor A. Kostrikin, Candidate of Agriculture; Leading Research Scientist;
ResearcherID: [U-2449-2019](https://orcid.org/0000-0003-1939-4743), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1939-4743>

Viktor K. Shirnin, Doctor of Agriculture, Leading Research Scientist;
ResearcherID: [U-1932-2019](https://orcid.org/0000-0003-2614-3416), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2614-3416>

Svetlana A. Kryukova, Junior Research Scientist, Postgraduate Student;
ResearcherID: [F-6016-2019](https://orcid.org/0000-0002-3648-6845), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3648-6845>

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, 394087, Lomonosova street, 105, Voronezh, Russian Federation; e-mail: ilgis@lesgen.vrn.ru, v.kostrikin2015@yandex.ru

Abstract. In the Voronezh region the share of seed plantations is less than half of the area of oak forests. Therefore, the regeneration of high-quality forests of seed origin with improved hereditary characteristics is a major challenge. In the production of seeds of improved breeding categories, plus stands play an important role. They produce improved seeds, if minus trees are removed. Moreover, permanent forest seed plots which were planted by the plus stand offspring, produce seeds of the required breeding category. Current laws and regulations do not provide specific recommendations on selection of plus stands. To address this issue and establish the criteria by which such forest stands should be selected we examined all the best stands containing plus trees in the Voronezh region (those that are candidates for plus stands). The frequency of occurrence of plus trees varies from 2 to 10 trees per 10 ha. We took the average value as the minimum to classify the forest plot as a plus stand. Marking forest stands as plus stands based on selection inventory data is recommended regardless of the time of the forest management fieldwork. Besides this, we performed a detailed inventory of the plus stand in the quadrant 41 of the Krasnoye divisional forestry area in the Vorontsovskoye forestry area on the area of 10.7 ha. The study was carried out on 10 trial plots (1 ha each), where a selection inventory was conducted, as well as an inventory of trees by technical assessment with a detailed description of each oak specimen by inventory characteristics, condition and the presence of flaws. The data obtained by selection inventory with identification of “good trees” (sum of plus and normally best trees) correlate with distribution of trees by technical assessment categories. The identified patterns can be used for selection inventory of oak plantations. We recommend to place stands in a category of plus stand if their forest density ranges from 0.7 to 0.9, more than 35 % of the trees have commercial wood and if this plot has at least one plus tree per two ha. Restoring oak forests with acorns harvested from plus stands will improve the quality of forest plantations.

For citation: Kostrikin V.A., Shirnin V.K., Kryukova S.A. Criteria for Assessment of Plus Oak Stands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 68–79. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-68-79

Keywords: oak, plus stand, selection inventory, technical assessment categories of trees.

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-80-96

ЛЕСОКУЛЬТУРНОЕ ПРОИЗВОДСТВО – ОСНОВА НЕПРЕРЫВНОСТИ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ

Б.А. Мочалов¹, д-р с.-х. наук, проф.;

С.В. Бобушкина², канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-6407-2019](https://orcid.org/0000-0003-3137-2934)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3137-2934>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163001; e-mail: bmochalov@mail.ru

²Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: svetlana.bobushkina@sevniilh-arh.ru

Аннотация. В настоящее время основополагающим направлением в природопользовании является принцип неистощительного использования лесов. Решение проблем устойчивого развития лесного хозяйства Европейского Севера предполагает обеспечение качественного воспроизводства лесных ресурсов. Основные блоки лесокультурного производства – это заготовка и подготовка семян, выращивание посадочного материала, создание новых древостоев и агротехнические уходы за ними. Цель федерального проекта «Сохранение лесов» – достигнуть к 2024 г. баланса вырубки и воспроизводства древостоев в соотношении 100 %. При этом акцент делается на использовании для искусственного лесовосстановления посадочного материала с закрытыми корнями. Недостаточное количество информации о долгосрочной перспективе его применения, а также дефицит данных о результатах длительных наблюдений за ростом и состоянием лесных культур, созданных сеянцами с комом субстрата, и о сравнении таких сеянцев с традиционным посадочным материалом, особенно в условиях Севера, актуализируют тему исследований. Их цель – по результатам долговременных испытаний выявить условия, позволяющие получать качественный посадочный материал, а также оценить возможность успешного восстановления сосны на вырубках севера европейской части России путем создания лесных культур с использованием региональных интенсивных технологий. Основными объектами наблюдений являются питомники региона, применяемые в них методы работы и экспериментальные посадки сосны, заложенные в Каргопольском и Архангельском лесничествах в 2000–2001 гг. На участках культур, созданных из различных видов посадочного материала (сеянцы, саженцы, посадочный материал с закрытыми корнями), в динамике определяли сохранность, диаметр, высоту, запас. Учеты проводили с несколькими повторениями и разделением растений на здоровые, больные и сухие. Также отмечены пороки стволов и произведен учет естественного возобновления. По данным исследований показана возможность успешного восстановления сосны на вырубках севера европейской части России при использовании региональных интенсивных технологий производства различного посадочного материала и создания лесных культур. Это позволит сократить срок перевода молодняков в естественные условия и повысить продуктивность насаждений. Сравнение средних диаметров и высот за все периоды учета указывает на влияние вида посадочного материала и густоты посадки на рост и развитие деревьев. На протяжении времени наблюдений по всем параметрам лидировали культуры из саженцев. Их высота и диаметр на 20–44 % выше, чем у однолетних сеянцев, а по объему стволика разница с другими видами посадочного материала достигает 1,9–2,9 раза.

Для цитирования: Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. Лесокультурное производство – основа непрерывности лесопользования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 80–96. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-80-96

Финансирование: Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований.

Ключевые слова: семена, посадочный материал, сеянцы с открытыми корнями, сеянцы с закрытыми корнями, саженцы, питомник, теплица, лесные культуры, обработка почвы.

Введение

Целью работы была оценка возможности успешного восстановления сосны на вырубках севера европейской части России при использовании региональных интенсивных технологий выращивания посадочного материала и создания лесных культур, что способствует более быстрому переводу искусственно полученных насаждений в покрытые лесом земли, а также повышению продуктивности древостоев.

В задачи входило: знакомство с мировым опытом искусственного лесовосстановления, обобщение полученных Северным научно-исследовательским институтом лесного хозяйства результатов в области выращивания посадочного материала и использования его для создания насаждений, проведение обследования опытно-производственных лесных культур сосны, анализ полученных данных.

Во 2-м томе «Истории управления лесами Российского государства» указывается, что с 80-х гг. XIX века до 1914 г. в европейской части России лесистость уменьшилась с 37,6 до 32,0 %. На рубеже столетий лесным департаментом предпринимались значительные усилия для организации проведения лесохозяйственных мероприятий. Однако их было явно недостаточно, чтобы нейтрализовать последствия разрушительных для естественных древостоев воздействий, связанных со стремительным развитием лесной промышленности. В результате многочисленных рубок и природных явлений, таких как пожары, вспышки численности вредителей, грибные болезни, а также недостаточности объемов лесовосстановительных мероприятий, сократилась площадь лесов, произошла массовая нежелательная смена ценных пород малоценными [2].

Качественное восстановление лесов лежит в основе эффективного лесопользования, а недостатки в системе планирования данных мероприятий влекут за собой изменение состава, структуры и функциональности насаждений. В таких условиях устойчивое лесопользование практически невозможно, что кардинально влияет на экономику региона и страны.

Одно из основных отличий искусственного восстановления леса в том, что при знании биологии пород возможны массовая селекция при выращивании посадочного материала и использование естественного почвенного плодородия при создании лесных насаждений. Комплекс научно обоснованных агротехнических приемов позволяет сформировать наиболее оптимальные условия среды для развития растений в питомниках и культурах.

Успешность создания лесных насаждений посадкой в большой мере зависит от грамотного выбора типа культур и соответствующей подготовки почвы [4, 6–8]. При этом многими исследованиями [9, 12, 13, 16] подтверждается большая зависимость продуктивности лесных культур от качества посадочного материала, чем от агротехнических мероприятий.

Актуальность исследования не вызывает сомнений в связи с недостатком информации о результатах длительных наблюдений за ростом и состоянием лесных культур, созданных сеянцами с комом субстрата, и сравнения его с традиционным посадочным материалом, особенно в условиях Севера.

Изучение многовариантных опытов культур сосны в динамике, их сравнение с естественным лесовосстановлением является одним из этапов получения знаний с целью разработки рекомендаций для перехода на интенсивную модель ведения лесного хозяйства.

Объекты и методы исследования

В основе исследований лежит комплексное использование методов эксперимента, наблюдения и сравнения, математической обработки данных и статистического анализа. В работе применялись известные в почвоведении и лесоводстве методики определения физических и химических свойств почв и субстратов, биометрических параметров и качества посадочного материала, а также лесных культур.

Объектами служили лесные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), высаженные в 2000–2001 гг. в Архангельском (Северо-таежный р-н) и Каргопольском (Двинско-Вычегодский лесной р-н) лесничествах Архангельской области. Древостои созданы традиционными саженцами и сеянцами, а также посадочным материалом с закрытыми корнями (ПМЗК) в рамках российско-финской программы «Развитие устойчивого лесного хозяйства и сохранения биоразнообразия природы на Северо-Западе России». Кроме того, изучались технологии производства посадочного материала в питомниках и тепличных комплексах региона.

Традиционный посадочный материал для создания лесных культур выращивался в теплицах и питомниках с высоким уровнем плодородия почв и соблюдением региональных технологий, разработанных сотрудниками Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства. Сеянцы с комом субстрата были выращены в Вельском тепличном комплексе.

В Архангельском лесничестве за год до посадки культур почву готовили бульдозером путем создания полос шириной 4 м. В качестве лесокультурной площади использовали территорию, пройденную ветровалом. Тип леса – ельник черничный свежий. Растения размещали в основном по краям борозд – на микроповышениях, т. к. в понижениях наблюдался избыток влаги. В Каргопольском лесничестве посадку проводили на вейниковой вырубке, тип леса до рубки – сосняк брусничный. Для обработки почвы одной части участка использовали плуг ПЛП-135, другой – ПЛД-1.

Саженцы сосны и ПМЗК размещали на площадках, исходя из рекомендаций, по 2,5 тыс. шт./га, а сеянцы с оголенной корневой системой (ОК) – по 4 тыс. шт./га. Контейнеризированные сосны и ели садили с помощью посадочной трубы, традиционные сеянцы – под меч Колосова, для саженцев наряду с этими устройствами использовали лопату. Перед перенесением в открытый грунт посадочный материал с комом и ПМЗК поливали, а корневую систему сеянцев и саженцев обмакивали в торфяную болтушку. Опыты заложены в 2–3 повторениях, число растений в каждом варианте 300–500 шт.

В ходе исследований применены различные виды обработки почвы и использован неодинаковый посадочный материал. Опытные варианты посадки осуществляли в средней и северной подзонах тайги в плужные пласты и микроповышения со строгим контролем качества работ.

Для изучения динамики роста культур проводили их обследования в первые 3 года, затем в возрасте 6, 11 и 15 лет: сплошной пересчет деревьев для определения их сохранности; измерение диаметра мерной вилкой, высоты – с помощью высотомера. Также зафиксировано количество естественно возобновившейся древесной растительности и пороков стволов сосен. Произведена оценка естественного восстановления на близлежащей вырубке.

Результаты исследования и их обсуждение

Искусственное восстановление леса имеет 4 основных составляющих: заготовка и подготовка семян; выращивание посадочного материала; создание лесных культур; агротехнические уходы за посадками.

Семенной материал. Одной из основных целей при производстве сеянцев в питомниках считается эффективное использование селекционно-улучшенных семян. Их требуемый объем при выращивании посадочного материала в теплицах значительно снижается [3].

Для успешного лесовосстановления, создания культур высоких устойчивости и производительности важно соответствие места культивирования растения району происхождения семян, из которых получен посадочный материал. Переброска семян от места сбора в направлении север–юг допускается на расстояние не более 100 км, по высоте – до 100 м. Следует избегать использования семенного материала из северных районов в южных, и тем более – наоборот [15]. По нашему мнению, одной из причин массовой гибели культур на севере России в 50–60 гг. XX в. было использование семян из центральных и южных районов страны.

Шведские ученые [20] также рекомендуют применять для получения сеянцев семена местных климатипов. При этом для повышения генетического разнообразия предлагается смешивать семена различных популяций в пределах целевого района выращивания.

Качество искусственно создаваемых насаждений во многом определяется наследственными свойствами используемого семенного материала. Исследованиями доказано, что применение семян с улучшенными наследственными характеристиками способствует увеличению продуктивности создаваемых древостоев на 15–20 %.

В регионе для посева в питомниках и создания лесных культур хвойных пород в основном используют семена массового сбора. Малая доля приходится на семенной материал с лесосеменных плантаций (ЛСП) и постоянных лесосеменных участков (ПЛСУ). При довольно большом наборе объектов единого генетико-селекционного комплекса в регионе они используются неэффективно. Сбор семян с плюсовых деревьев и древостоев провести сложно. ПЛСУ в значительном количестве не отвечают требованиям, существует необходимость проведения уходов и замены многих из них. ЛСП и испытательных культур очень мало, что снижает возможность генетической оценки плюсовых деревьев и насаждений [1]. Надежное обеспечение

лесного хозяйства семенами древесных пород с высокими посевными качествами и ценными наследственными свойствами возможно при создании соответствующей постоянной семенной базы на генетико-селекционной основе. В целом наличие такой базы на севере европейской части России соответствует положению об их распределении по природным зонам.

Обязательным звеном в производственной цепи выращивания ПМЗК является сортировка семян. Это обусловлено как особенностью конструкций высевающих устройств, так и тем, что в процессе распределения семян оставляют наиболее качественные из них, а больные, пустые и поврежденные удаляются.

Сортировка семян по весу сильно влияет на рост сеянцев (наилучшие показатели имеют деревья, выращенные из более тяжелых семян [20]), но меньше, чем считалось раньше, на генетическое разнообразие партии семян, т. к. внутришишечные вариации объясняют большую долю общего изменения в массе семян по сравнению с вариацией между шишками, деревьями или клонами.

Выращиваемый посадочный материал может быть следующий: сеянцы с ОК; саженцы с ОК, или крупномерный посадочный материал; сеянцы с закрытыми корнями (ЗК), или ПМЗК. Как показали многолетние исследования, производство лесных культур посадкой – один из компонентов своевременного и успешного создания высокопродуктивных насаждений. При этом посадочный материал должен обладать высоким качеством и соответствовать условиям конкретной лесокультурной площади.

Производство сеянцев и саженцев в питомниках Европейского Севера имеет свои особенности и затрудняется низким плодородием почв, на которых располагаются предприятия, относительно коротким вегетационным периодом, возможными заморозками в любой летний месяц. Применение в таких условиях технологических приемов, созданных для питомников, расположенных в других частях РФ, не давало сеянцев и саженцев желаемого качества, а также не позволяло получить необходимый объем посадочного материала. В связи с этим стояла задача разработки региональных технологий производства сеянцев и саженцев [9].

Интенсивная технология выращивания посадочного материала для лесовосстановления, по нашему мнению, должна основываться на принципе комплексного действия на растения в первую очередь таких факторов, как климат и особенности почвы, и совмещать ряд научно обоснованных агротехнических приемов, которые обеспечат благоприятные почвенные условия в питомниках, грамотное применение мелиорантов, гербицидов и фунгицидов, а также региональные (конкретные) технологические методы, позволяющие выращивать целевой посадочный материал высокого качества.

Под качеством посадочного материала мы понимаем соответствие его размеров и внешних показателей нормативным требованиям. Кроме того, следует принимать во внимание и такую характеристику, как оптимальное соотношение массы тонких (диаметр менее 1 мм) физиологически активных корней к массе надземной части, которое способствует хорошей приживаемости и высокой интенсивности роста в культурах в первые годы после посадки.

Исследования показали, что наиболее важным этапом выращивания сеянцев и саженцев в открытом грунте является облагораживание почв питомников

и восстановление их плодородия, а лимитирующим фактором в слабокультуренных подзолистых почвах выступает плотность сложения пахотного слоя (табл. 1).

Таблица 1

Параметры 3-летних сеянцев сосны при различной плотности почвы

Характеристики почвы		Показатели						
Плотность, г/см ³	Пористость, %	Высота, см		Диаметр, мм		Прирост, см	Масса, г	Выход стандартных сеянцев, %
		М	±m	М	±m			
1,38	46,7	11,9	0,44	2,4	0,07	7,5	1,33	54
1,26	50,9	16,9	0,63	2,6	0,09	11,3	2,03	74
1,17	55,4	19,6	0,53	3,1	0,09	12,8	2,48	95
1,14	55,9	18,3	0,73	3,6	0,13	12,0	3,61	98
0,98	62,9	17,3	0,64	3,0	0,13	11,3	2,69	89

Примечание: М – среднее значение, ±m – ошибка среднего значения. Прирост – прирост последнего года. Масса – масса одного растения в абсолютно сухом состоянии.

Внесение малых доз органических удобрений в почвы с содержанием гумуса менее 1–2 % не обеспечивает оптимальных параметров этого показателя и плотности. На 2–3-й год выращивания сеянцев и саженцев она увеличивается, нарушаются физиологические и биохимические функции растений, что приводит к снижению интенсивности роста и развития практически всех органов дерева и, что очень важно, к нарушению оптимального соотношения массы надземной части к массе тонких физиологически активных корней. Зависимость роста сеянцев и саженцев сосны и ели в высоту и по диаметру от плотности почвы пахотного слоя – линейная обратная, с высоким уровнем достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,8992...0,9908$).

Таким образом, для снижения плотности почвы на протяжении всего периода выращивания посадочного материала требуется использование добавок, не ухудшающих химические характеристики почвы. Установлено, что низинный торф пригоден для этих целей и более доступен для питомников Европейского Севера. Оптимальные нормы внесения органических и минеральных удобрений для каждого типа почв с учетом степени их окультуренности определяются экспериментально. Сокращение отрицательного действия климатических факторов на прорастание семян и выжимание растений достигается рекомендованными агротехническими приемами, характерными для определенного региона и питомника [11].

Как было отмечено, неотъемлемый элемент интенсивной технологии – это истребление сорняков и защита от вредителей и болезней. В лесопитомниках Европейского Севера могут применяться гербициды и фунгициды, разрешенные в данный период, а нормы, сроки и способы их использования должны быть апробированы в конкретных условиях. Несоблюдение этих правил может стать причиной гибели сеянцев или саженцев, снижения выхода и качества посадочного материала и заражения почвы с выводом ее на некоторое время из севооборота. К аналогичным результатам приводит нарушение правил использования минеральных, особенно азотных и калийных,

удобрений. Издержки, возникающие при внедрении технологии, оправдывают себя, т. к. растут качество посадочного материала и его выход. Это способствует лучшей приживаемости молодых деревьев на лесокультурной площади, быстрому началу интенсивного роста после посадки, исключает потребность в проведении большого количества уходов.

Метод выращивания ПМЗК отличается от традиционного высокой технологичностью производства, сокращением сроков выращивания сеянцев, отсутствием конкуренции между растениями, эффективным использованием семян. Растения в ячейках формируют компактную корневую систему, что способствует снижению риска ее повреждения при перевозке и посадке. Недостатки данного метода – это большая стоимость тепличного комплекса, потребность в наличии соответствующей материально-технической базы и привлечении специалистов высокой квалификации. Исследования в разных подзонах тайги севера России и практический опыт показывают, что при создании культур ПМЗК, как и традиционным, необходимо строго соблюдать все правила хранения посадочного материала, обработки почвы, определения места посадки, ее условий и агротехнических уходов. Для чего требуется постоянное обучение работников и повышение их квалификации, а также контроль качества работ.

При выращивании ПМЗК в тепличных комплексах нужно поддерживать рекомендуемые режимы температуры воздуха и влажности субстрата, обеспечивать равномерность полива кассет и однородность распределения мелиорантов в почвенном коме, чтобы в каждой ячейке получалась примерно одинаковая концентрация раствора удобрений.

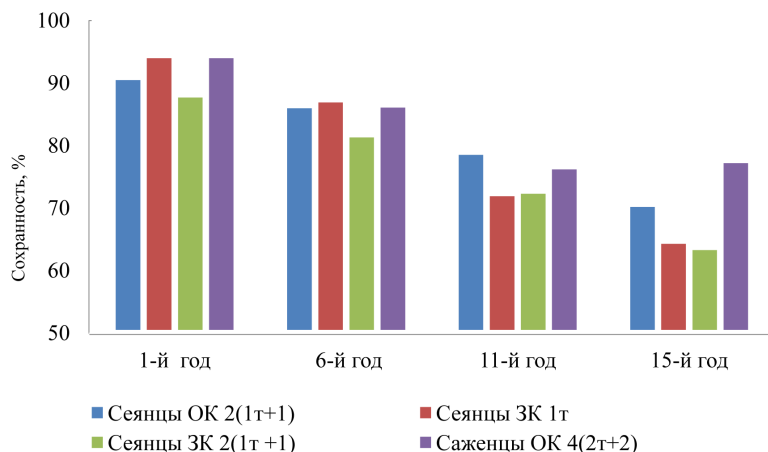
Производство лесных культур. Слагающими высокой приживаемости и успешного роста культур являются высокое качество ПМ и его (в т. ч. крупномерных саженцев) способность конкурировать с травой и листовыми породами, максимально возможное использование естественного плодородия почвы посредством применения соответствующих способов ее обработки, своевременные агротехнические и лесоводственные уходы.

Скандинавские лесоводы применяют так называемую перевернутую вспашку, в ее процессе слой гумуса перемещается на дно лунки или борозды, сверху оказывается минеральная почва, толщина которой составляет около 10 см [19, 22 и др.]. Кроме того, Рикала Р., Дель Кампоа А.Д. и др. [14, 18] подчеркивают важность грамотного выбора места посадки.

Подготовка почвы под посадку сеянцев и саженцев активно практикуется в северных областях Америки и Европы [21, 24]. Авторы отмечают положительные результаты этой операции: усиление роста корневой системы за счет повышения температуры почвы, а также сокращение риска повреждения деревьев ночными заморозками; улучшение аэрации почвы; снижение представленности растений-конкурентов, что имеет большое значение в тех регионах, где ограничено применение гербицидов. Кроме того, если грамотно выбрать способ и метод обработки почвы, можно сократить выжимание растений морозом [17]. Обработка дренированных почв должна способствовать повышению влажности в зоне роста корней [22].

В 1-й год на опытно-производственном участке Архангельского лесничества приживаемость сеянцев и саженцев сосны была в пределах 87,0–94,0 %, на 6-й год

ее снижение составило 6,4–7,1 %. В 11 лет данный показатель оставался довольно высоким – 71,9–78,5 % (см. рисунок).



Приживаемость и сохранность сеянцев и саженцев сосны в культурах Архангельского лесничества: 2(1т+1) – 2-летний посадочный материал, 1-й год – под пленкой, 2-й – доращивание без пленки; 4(2т+2) – 4-летние саженцы, 2 года – в теплице, 2 – в школьном отделении питомника

Survival rate and conservation of pine seedlings and plantlets in forest crops of the Arkhangelsk forestry: 2(1g+1) – 2-year-old planting stock, 1st year in a greenhouse, 2nd year in the open air; 4(2g+2) – 4-year-old plantlets, 2 years in a greenhouse, 2 years in a school unit of the nursery

Сохранность на 15-й год несколько различается у вариантов и групп лесных культур и находится в пределах 63,3–77,2 %. В интервале 11–15 лет у крупномерного посадочного материала она снизилась всего на 1,0 %. У сеянцев сокращение данного показателя составляет 8,0–9,0%. В итоге максимальную стабильность в рассматриваемых условиях показали саженцы сосны, выращенные по региональной технологии.

На сохранность лесных посадок в значительной степени влияют особенности почвы и способ ее обработки. Результаты исследований иллюстрируют недостаточно качественную подготовку суглинистой почвы бульдозером. Корневые системы большей части растений оказываются в горизонтах с высокой плотностью сложения и сниженным содержанием питательных элементов, что является причиной частичного отпада культур или замедления темпов роста.

Кроме того, спустя несколько лет после посадки контейнеризированных сеянцев причиной повышения интенсивности отпада может быть возникновение хемотропизма: в случае посадки растений на бедных почвах корни недостаточно выходят из богатого питательными элементами кома субстрата, извлекая из него все элементы и используя метаболиты на рост надземной части; со временем слабо развитая корневая система перестает удовлетворять потребности сеянца, организм ослабевает, снижаются темпы роста и деревья могут быстрее поражаться инфекцией или вредителями.

Приживаемость сосны на участке в Каргопольском лесничестве в 1-й год в целом составляла около 98,0 % (табл. 2). Наилучшим ее показателем характеризовались культуры из ПМЗК – 99,3 % (табл. 2). На микроповышениях, созданных плугом ПЛД-1, наблюдалось небольшое снижение приживаемости саженцев, которое объясняется изменением структуры почвенных горизонтов на грядках, где их слои более рыхлые.

Таблица 2

Показатели приживаемости и сохранности посадочного материала сосны в Каргопольском лесничестве

Посадочный материал	Участок с обработкой ПЛП-135			Участок с обработкой ПЛД-1,2		
	1-й год	2-й год	14-й год	1-й год	2-й год	14-й год
Сеянцы с ЗК	99,3	93,3	91,0	99,1	99,6	85,8
Сеянцы с ОК	95,9	91,9	88,7	98,8	92,7	76,7
Саженцы с ОК	98,1	95,9	91,0	89,8	86,7	80,8

По результатам наблюдений 2014 г., сохранность культур, посаженных на площади с обработкой ПЛП-135, составляла в среднем 89,0–91,0 %. В рядах у разных видов посадочного материала она изменялась в пределах 52,9–100 %, но в каждом варианте были участки с отличными показателями – 96,0–100 %, поэтому можно предположить, что в этом возрасте на сохранность больше влияет не вид посадочного материала, а другие факторы.

На площади, где почву обрабатывали орудием ПЛД-1, средняя сохранность растений из одинаковых видов посадочного материала на 3,0–12,0 % меньше, чем на участке, подготовленном ПЛП-135. Однако по абсолютным показателям в некоторых рядах она достигает максимума – 91,0–100 %.

В Архангельском лесничестве наибольший запас (61,5 м³/га) имеют лесные культуры, созданные крупномерным посадочным материалом, обладающим наибольшими биометрическими параметрами (табл. 3) и сохранностью. Культуры из сеянцев с ОК при самом малом диаметре, но больших густоте посадки и сохранности имеют запас ниже (45 м³/га), чем культуры из саженцев, но выше, чем культуры из сеянцев с комом (2-летних (39,2 м³/га) и 1-летних (40,6 м³/га)), превосходящие по диаметру, но меньшие по густоте.

Таблица 3

Размеры культур сосны в Архангельском лесничестве

Посадочный материал	Возраст	В 5 лет		В 11 лет		В 16 лет	
		<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	<i>D</i> , см	<i>H</i> , м
Саженцы с ОК	4(2т+2)	1,8	1,9	6,4±0,10	4,1±0,04	9,3±0,18	6,4±0,17
Сеянцы с ЗК	1 год	1,0	1,4	4,9±0,08	3,7±0,04	8,0±0,16	6,4±0,22
	2(1т+1)	1,3	1,4	4,6±0,15	3,4±0,07	8,3±0,14	6,2±0,16
Сеянцы с ОК	2(1т+1)	1,0	1,3	4,2±0,10	3,3±0,05	6,5±0,11	6,0±0,21

Примечание: Густота посадки, тыс. шт./га: сеянцы с ОК – 4,0; остальные варианты – 2,5. *D* – диаметр, *H* – высота.

Данные анализа средних параметров растений за время исследований позволяют утверждать, что густота посадки, а также вид посадочного материала

оказывают значительное влияние на рост и развитие растений на лесокультурной площади. В течение всего периода исследований средние высота и диаметр крупномерного посадочного материала были на 20,0–44,0 % выше, чем у 1-летних сеянцев, по объему стволика различие составляло 1,9–2,9 раза. Лидерство в росте во время приживания культур – ключевое условие успешности конкуренции дерева с травянистой растительностью.

В Каргопольском лесничестве на участках с обработкой почвы ПЛП-135 на 5-й год наибольшие параметры имели саженцы сосны. Сеянцы с комом и традиционные уступали им по высоте и диаметру на 28,0–52,0 %. Между собой по приросту и высоте сеянцы различались на 5,0–10,0 %.

Густота, средние диаметр и высота лесных культур на 14-й год представлены в табл. 4. Достоверность средних значений диаметра очень высокая (52...99) благодаря большому количеству замеров (примерно 340...600 деревьев в варианте).

Таблица 4

Характеристика опытно-производственных культур сосны (посадка 2000 г.)

Вид посадочного материала	Густота, тыс. шт./га		Средние значения		Объем дерева, м ³	Запас, м ³ /га
	2000 г.	2014 г.	<i>D</i> , см	<i>H</i> , м		
<i>Участок с обработкой почвы плугом ПЛП-135</i>						
Сеянцы с ЗК	2,50	2,14	8,9	6,2	0,0246	52,6
Сеянцы с ОК	4,00	3,55	6,9	5,9	0,0138	49,0
Саженцы с ОК	2,50	2,22	9,3	6,7	0,0265	58,8
<i>Участок с обработкой почвы орудием ПЛД-1</i>						
Сеянцы с ЗК	2,50	2,15	8,3	6,4	0,0204	43,9
Сеянцы с ОК	4,00	3,07	7,5	5,7	0,0153	47,0
Саженцы с ОК	2,50	2,02	8,9	6,7	0,0243	49,1

Примечание: Объем среднего дерева рассчитан по [5] (Таблица 3.21. «Объемы стволов в коре сосны Европейского Севера по высоте и диаметру на высоте 1,3 м при среднем коэффициенте формы»).

На площади, подготовленной под посадку культур орудием ПЛП-135, на 14-й год продолжают лидировать саженцы. У культур из сеянцев с ЗКС средний диаметр меньше на 10,0–13,0 % (при $t_{\phi} = 7,1-8,3$). Насаждение, созданное традиционными сеянцами, характеризуется меньшим средним диаметром по сравнению с культурами из ПМЗК на 13,0–23,0 % с высоким уровнем достоверности.

Одинаковые виды посадочного материала на площадях с использованием разных орудий для подготовки почвы к 14-летнему возрасту имеют примерно равные средние диаметры. Так, различия этого показателя в культурах из крупномерного посадочного материала не превышают 1,2 % и при этом не достоверны. В насаждениях, созданных ПМЗК и сеянцами с ОК на участке с подготовкой почвы ПЛП-135, средние показатели диаметров соответственно на 6,3 и 8,7 % выше с достоверным различием, чем на площади, обработанной орудием ПЛД-1.

Наибольшим запасом в данном возрасте характеризуются заложенные на пластах, обработанных плугом ПЛП-135, опытные культуры сосны из 4-летних саженцев, которые выращивались в течение двух лет в теплице и последующих

двух лет в школьном отделении питомника по региональной интенсивной технологии [10], разработанной Северным научно-исследовательским институтом лесного хозяйства.

Во время мониторинга лесных культур в обоих лесничествах у некоторых растений сосны зафиксированы особенности. Первая – кривизна ствола в нижней его части, что недопустимо при выращивании определенных видов деловой древесины. На 11-й год в Архангельском лесничестве доля крупномерного посадочного материала с кривизной ствола составляет 8,6 %, сеянцев с ОК и ЗК – 2,0–4,6 %. В Каргопольском лесничестве эта особенность наблюдается у всех видов посадочного материала. В то же время большая представленность растений с кривизной ствола (10,1 %) характерна для культур, созданных из наиболее крупных саженцев. Наименьшей долей – не более 1,5 % – искривленных стволов отличаются лесные культуры из 2-летних сеянцев с ОК. На участке насаждений из посадочного материала с комом субстрата представленность стволов с кривизной варьирует в пределах 4,5–7,9 %.

Вторая особенность исследуемых лесных культур, которая наблюдается на участках всех видов посадочного материала, – сухие деревья сосны. При этом они сохраняются на местах посадки и имеют высоту не менее 1 м. В Архангельском лесничестве доля их от количества всех высаженных растений колеблется в пределах 1,2–2,6 %. Отмечено, что на всех сухих деревьях кора в нижней части ствола объедена грызунами. По-видимому, данный фактор является одной из причин увеличения отпада культур.

При обследовании культур в 16-летнем возрасте были учтены растения с кривизной, а также травмированные снеговалом и снеголомом. В целом пороки на всей площади насаждения у деревьев, полученных из разного вида посадочного материала, составляют 10,5–17,7 %, при этом в культурах сосны с большей густотой пороков на 6,1–7,2 % меньше, чем при густоте 2,5 тыс. шт./га (табл. 5).

Таблица 5

**Встречаемость сосны с пороками в культурах
Архангельского лесничества (2016 г.)**

Посадочный материал	Густота посадки, тыс. шт./га	Учтено деревьев, шт.	Пороки, %			
			искривление ствола	снеголом	снеговал	всего
Сеянцы, ОК	4,0	352	8,8	1,1	0,6	10,5
2-летние сеянцы, ПМЗК	2,5	124	17,7	–	–	17,7
Саженцы	2,5	169	14,8	0,6	1,2	16,6

Факторы, ведущие к искривлению стволов, имеют как антропогенное, так и природное происхождение. Например, при посадке растение может быть расположено под большим углом или в край микроповышения. Такое явление отмечается при посадке в кромку пласта со стороны борозды на переувлажненных или осушенных заболоченных почвах, а также в естественных молодняках сосны, где оно зачастую обусловлено какой-либо патологией или местом прорастания семян.

В зарубежной практике существуют похожие проблемы выращивания лесных культур с использованием ПМЗК [26, 27]. Это происходит из-за особенностей конструкции ячейки для выращивания сеянцев с комом, завала травой, хемотропизма, неправильного выбора места посадки или подготовки почвы.

С совершенствованием технологии выращивания посадочного материала наблюдается сокращение количества искривленных растений [25]. С возрастом внешняя деформация основания стволиков снижается в связи с нарастанием комлевой части, однако внутренняя деформация может сохраниться [23]. Авторами отмечено, что откомлевка при заготовке древесины решает эту проблему.

Естественное возобновление культур на участке Архангельского лесничества отличается значительной густотой (табл. 6) и относительно высокой мозаичностью распространения в отдельных случаях. более

Подрост, находящийся в группе высоты менее 0,5 м, имеет наибольшую представленность 45,2 %. Доля растений в группах высоты 0,5–1,5 м, 1,5 м и более составляет 17,8 и 21,0 % соответственно. Вполне естественно, что значительное количество березы в группе высоты от 0,5 м и более становится лимитирующим фактором роста лесных культур сосны, т. к. появляется конкуренция за освещение и почвенное питание, вследствие чего могут сильно снизиться приживаемость и сохранность культур. В связи с этим требуется вырубка листовенных пород. Высокая доля экземпляров березы в группе высоты до 0,5 м демонстрирует активное продолжение распространения данной породы на территории участка лесных культур.

Еловый подрост на площади лесных культур сосны распределен по участку неравномерно, но в целом представленность его достигает почти 14,0 тыс. шт./га. Часть ели – это предварительная генерация, которая сохранилась между полосами при обработке почвы. Основная доля, по-видимому, последующее возобновление из семян от расположенных вокруг участка лесных культур куртин высоко возрастных еловых деревьев.

Таблица 6

**Состав, средняя встречаемость и густота подроста в культурах
(16 учетных площадок, размером по 2×5 м. Учеты 2016 г.)**

Порода	Встречаемость, %	Количество растений по группам высоты, тыс. шт./га, %			Итого	
		До 0,5 м	0,5–1,5 м	1,5 м и более	тыс. шт., %	%
Береза	100	32,0	17,8	21,0	70,8	64,1
		45,2	25,1	29,7	100	
Осина	56,3	1,4	1,0	1,4	3,8	3,4
		37,1	25,8	37,1	100	
Рябина	31,2	0,6	1,8	5,8	8,2	7,4
		7,3	22,0	70,7	100	
Ива	93,8	6,5	3,2	2,5	12,2	11,1
		53,0	26,2	20,8	100	
Сосна	12,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,4
		33,3	33,3	33,3	100	
Ель	100	7,5	5,9	0,5	13,9	12,6
		54,0	42,4	3,6	100	
Всех пород		48,5	30,2	31,7	110,4	100
		43,9	27,4	28,7	100	

Примечание: Встречаемость – количество учетных площадок с данной породой.

В Архангельском лесничестве рядом с участком экспериментально-производственных культур на территории вырубки старше 15 лет, оставленной для естественного зарастивания, произведен учет естественного возобновления. Данный участок – характерный пример естественного восстановления леса на большей части вырубаемых лесных площадей региона.

Среднее количество возобновившихся пород составляет 33,6 тыс. шт./га, из которых 90,8 % – лиственные и лишь 9,2 % – хвойные. Основная часть возобновления (86,6 %) представлена группой от 1,5 м и более, и только 1,5 % имеют высоту до 0,5 м, что говорит о продолжении возобновления под пологом лиственных пород, имеющих в результате значительного объема опада мощную подстилку, препятствующую попаданию семян в минеральные слои почвы.

Среди лиственных основную долю составляют рябина и береза – 48,5 и 43,3 % соответственно, причем исключительно в группе выше 1,5 м встречаемость почти 100 %. В этой же группе высоты зафиксирован только 1 экземпляр сосны.

Представленность ели: на одной из площадок обнаружено деревце высотой менее 0,5 м, на трех площадках – 9 шт. высотой 0,5–1,5 м, на двух – экземпляры от 1,5 м и выше. Крайне малое количество еловых деревьев среди возобновившихся пород в сравнении с участком искусственного лесовосстановления, вероятно, объясняется минерализацией почвы в процессе ее обработки и корчевки пней.

Заключение

Результаты исследований опытно-производственных культур в таежной зоне свидетельствуют, что создание лесных насаждений высококачественным посадочным материалом с закрытыми и открытыми корнями, саженцами при соблюдении необходимых требований по их извлечению из почвы, перевозке и хранению способствует высокой сохранности и приживаемости древостоя, а также активному росту в первые годы.

Сосновые насаждения, созданные крупномерным посадочным материалом, лидируют по всем показателям и спустя 3 года после посадки почти не испытывают негативного влияния травянистой растительности.

В результате мониторинга роста лесных культур, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой, обнаружено, что их приживаемость и сохранность в благоприятных почвенно-гидрологических условиях и при хорошей погоде на Европейском Севере имеют высокие значения. Такие насаждения при обеспечении своевременных и эффективных уходов могут служить гарантией формирования высокопродуктивных древостоев. В то же время, показано, что в экстремальных почвенных и погодных условиях приживаемость сеянцев с комом субстрата на лесокультурной площади может существенно сокращаться.

По результатам исследований отмечено, что в условиях средней и северной тайги из-за активного возобновления лиственных пород и смыкания в рядах крон сосен (из всех видов посадочного материала) произошло сокращение их прироста по высоте и диаметру. Таким образом, в лесных культурах из всех видов посадочного материала требуются лесоводственные уходы.

Со смыканием крон в рядах формирующихся молодняков густота становится одним из основных факторов, влияющих на рост и развитие главной породы. Для поиска ответа на вопрос об оптимальной густоте посадки сосны необходим комплексный подход, учитывающий условия природной зоны, тип леса и экономико-организационные возможности хозяйства. В современных условиях при изучении лесных культур с различной первоначальной густотой наряду с продуктивностью и устойчивостью насаждений следует учитывать и экономическую составляющую.

Таким образом, эффективность выращивания лесных культур обеспечивается высоким качеством посадочного материала (оптимальное отношение массы надземной части к массе физиологически-активных корней), соответствием почвенных условий территории культивируемой породе, грамотной обработкой почвы способами, которые позволят максимально использовать ее плодородие, а также качественным выполнением лесопосадочных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барзут В.М., Мочалов Б.А., Гаевский Н.П., Демидова Н.А. Результаты российско-скандинавского проекта по лиственнице // Лиственничные леса Архангельской области, их использование и воспроизводство: материалы II регион. рабочего совещ. (22–25 сентября 2008 г.). Архангельск, 2008. С. 82–97.

Barzut V.M., Mochalov B.A., Gaevskiy N.P., Demidova N.A. Results of the Russian-Scandinavian Larch Project. *Larch Forests of the Arkhangelsk Region, Their Use and Reproduction. Proceedings of the 2nd Regional Workshop (September 22–25, 2008)*. Arkhangelsk, 2008. p. 82–97.

2. Двухсотлетие учреждения лесного департамента. 1798–1998. Т. 2. Федеральная служба лесного хозяйства России. М.: ВНИИЦлесресурс, 1998. 243 с.

Bicentennial Establishment of the Forest Department. 1798–1998. Vol. 2. Federal Forestry Service of Russia. Moscow, VNIITslesresurs Publ., 1998. 243 p.

3. Жигунов А.В. Современные технологии выращивания посадочного материала // Лесн. вестн. 2011. № 7(272). Режим доступа: http://www.spb-niil.ru/pdf/Trudy_5.pdf (дата обращения: 20.02.2019).

Zhigunov A.V. Modern Technologies of Growing Planting Stock. *Lesnoy vestnik [Forestry Bulletin]*, 2011, no. 7(272).

4. Кабанова С.А. Изучение лесных культур сосны, созданных в процессе реконструкции малоценных насаждений в государственном национальном природном парке «Бурабай» // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2011. № 347. С. 162–165.

Kabanova S.A. Study of Pine Forest Crop Grown in the Process of Reconstruction of Low-Value Plantations in the Burabay State National Natural Park. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Tomsk State University Journal]*, 2011, no. 347, pp. 162–165.

5. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / сост. Г.С. Войнов, Н.П. Чупров, С.В. Ярославцев, С.В. Торхов, А.П. Шушарин. Архангельск: СевНИИЛХ: Правда Севера, 2012. 672 с.

Forest Valuation Handbook for the North-East Part of the Russian Federation (Official Materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk and Vologda Regions and Komi Republic). Content by G.S. Voynov, N.P. Chuprov, S.V. Yaroslavtsev. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 2012. 672 p.

6. Маркова И.А. Пути повышения эффективности лесокультурного производства // Таежные леса на пороге XXI века: тр. СПбНИИЛХ. СПб., 1999. С. 61–71.

Markova I.A. Ways to Increase the Efficiency of Silvicultural Production. *Taiga Forests on the Threshold of the XXI Century: Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. Saint Petersburg, 1999, pp. 61–71.

7. Мелехов И.С. Рубки и возобновление леса на Севере. Архангельск: Арханг. кн. изд-во, 1960. 200 с.

Melekhov I.S. *Felling and Reforestation in the North*. Arkhangelsk, Arkhangel'skoye knizhnoye izdatel'stvo, 1960. 200 p.

8. Мелехов И.С., Корконосова Л.И., Чертовской В.Г. Руководство по изучению типов концентрированных вырубок. Изд. 2-е, доп. и испр. М.: Наука, 1965. 180 с.

Melekhov I.S., Korkonosova L.I., Chertovskaya V.G. *Guidelines for the Study of Concentrated Felling Types*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 180 p.

9. Мочалов Б.А. Использование разных видов посадочного материала для лесовосстановления в зоне тайги европейской части России // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере: сб. науч. тр. СевНИИЛХ. Архангельск, 2005. С. 123–136.

Mochalov B.A. The Use of Different Types of Planting Stock for Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia. *Issues of Taiga Forestry in the European North: Collection of Academic Papers of NRIF*. Arkhangelsk, 2005, pp. 123–136.

10. Мочалов Б.А. Рекомендации и технологические карты по выращиванию саженцев сосны и ели в питомниках северной и средней подзон тайги европейской части России. Архангельск: СевНИИЛХ, 2005. 36 с.

Mochalov B.A. *Recommendations and Technological Charts for Growing Pine and Spruce Seedlings in Nurseries of the Northern and Middle Taiga Subzones of the European Part of Russia*. Arkhangelsk, NRIF Publ., 2005. 36 p.

11. Мочалов Б.А. Значение лесокультурного производства в лесовосстановлении на Севере // Проблемы таежного лесоводства: сб. науч. тр. СевНИИЛХ. Архангельск, 2010. С. 106–119.

Mochalov B.A. Significance of Silvicultural Production in Reforestation in the North. *Problems of Taiga Forestry: Collection of Academic Papers of NRIF*. Arkhangelsk, 2010, pp. 106–119.

12. Мочалов Б.А., Сеньков А.О., Мочалова Г.А., Артемьева Н.Р. Изменение условий среды на вырубке при подготовке почвы и влияние их на рост культур сосны из семян с закрытыми корнями // Сохраним планету Земля: сб. докл. Междунар. экол. форума (1–5 марта 2004 г.). СПб, 2004. С. 333–337.

Mochalov B.A., Sen'kov A.O., Mochalova G.A., Artem'yeva N.R. Changes in Environmental Conditions at a Felling Site during Soil Preparation and Their Influence on the Growth of Pine Ball-Rooted Seedlings. *Save the Earth: Proceedings of the International Ecological Forum (March 1–5, 2004)*. Saint Petersburg, 2004, pp. 333–337.

13. Пугарев Ф.Т., Сенчуков Б.А., Беляев В.В. Состояние и рост лесных культур в зависимости от вида, возраста и размеров посадочного материала // Искусственное восстановление леса на Севере. Архангельск: АИЛиЛХ, 1979. С. 85–97.

Pigarev F.T., Senchukov B.A., Belyaev V.V. State and Growth of Forest Crops Depending on Type, Age and Size of Planting Stock. *Artificial Reforestation in the North*. Arkhangelsk, AFFCI Publ., 1979, pp. 85–97.

14. Рикала Р. Производство посадочного материала в Финляндии // Лесовосстановление на Европейском Севере: материалы финляндско-российского семинара по лесовосстановлению в Вуокатти (Финляндия 28 сентября – 2 октября 1998 г.). Научный центр Вантаа, 2000. С. 133–146.

Rikala R. Production of Planting Stock in Finland. Reforestation in the European North. *Proceedings of the Finnish-Russian Seminar on Reforestation in Vuokatti (Finland September 28 – October 2, 1998)*. Vantaa, Vantaa Science Center Publ., 2000, pp. 133–146.

15. Степанов А.С. Выращивание и использование посадочного материала с закрытой корневой системой. Петрозаводск, 2008. 24 с.
Stepanov A.S. *Cultivation and Use Ball-Rooted Planting Stock*. Petrozavodsk, 2008. 24 p.
16. Сунгуров П.В., Сунгурова Н.Р. Продолжительность влияния параметров посадочного материала на рост лесных культур // Уч. зап. ПетрГУ. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2013. № 8. С. 64–69.
Sungurova N.R. Sungurov R.V. Duration of Influence of Planting Materials' Parameters on Growth of Forest Cultures. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta (sel'skokhozyaystvennyye nauki)* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences], 2013, no. 8, pp. 64–69.
17. Bergsten U., Goulet F., Lundmark T., Löfvenius O.M. Frost Heaving in a Boreal Soil in Relation to Soil Scarification and Snow Cover. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 31, no. 6, pp. 1084–1092. DOI: <https://doi.org/10.1139/x01-042>
18. Del Campo A.D., Navarro-Cerrillo R.M., Hermoso J., Ibáñez A.J. Relationship between Root Growth Potential and Field Performance in Aleppo Pine. *Annals of Forest Science*, 2007, vol. 64, no. 5, pp. 541–548. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2007031>
19. Heiskanen J., Saksa T., Luoranen J. Soil Preparation Method Affects Outplanting Success of Norway Spruce Container Seedlings on Till Soils Susceptible to Frost Heave. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 1, art. 893. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.893>
20. Himanen K., Helenius P., Ylioja T., Nygren M. Intracone Variation Explains Most of the Variance in *Picea abies* Seed Weight: Implications for Seed Sorting. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 470–477. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0379>
21. Johansson K., Nilsson U., Örlander G. A Comparison of Long-Term Effects of Scarification Methods on the Establishment of Norway Spruce. *Forestry*, 2013, vol. 86, iss. 1, pp. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cps062>
22. Lammi E. *Markbehandling på boreal skogsmark med fokus på markberedning – en litteraturoversikt*. Examensarbete i ämnet skogshushållning. Umeå, Sveriges lantbruksuniversitet, 2006. 118 p.
23. Lindström A., Rune G. Root Deformation in Plantations of Container-Grown Scots Pine Trees: Effects on Root Growth, Tree Stability and Stem Straightness. *Plant and Soil*, 1999, vol. 217, iss. 1-2, pp. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004662127182>
24. Nilsson U., Luoranen J., Kolström T., Örlander G., Puttonen P. Reforestation with Planting in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 4, pp. 283–294. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.498384>
25. Rune G. Slits in Container Wall Improve Root Structure and Stem Straightness of Outplanted Scots Pine Seedlings. *Silva Fennica*, 2003, vol. 37, no. 3, pp. 333–342. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.493>
26. Rune G., Warensjö M. Basal Sweep and Compression Wood in Young Scots Pine Trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, iss. 6, pp. 529–537. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827580260417189>
27. Warensjö M., Rune G. Stem Straightness and Compression Wood in a 22-Year-Old Stand of Container-Grown Scots Pine Trees. *Silva Fennica*, 2004, vol. 38, no. 2, pp. 143–153. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.424>

SILVICULTURAL PRODUCTION AS A BASIS FOR CONTINUITY OF FOREST MANAGEMENT

*Boris A. Mochalov*¹, Doctor of Agriculture, Prof.

*Svetlana V. Bobushkina*², Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [AAD-6407-2019](https://orcid.org/0000-0003-3137-2934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3137-2934>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: bmochalov@mail.ru

²Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: svetlana.bobushkina@sevniilh-arh.ru

Abstract. Currently, the principle of sustainable use of forests is a fundamental direction in the management of natural resources. Solving the problems of sustainable development of forestry in the European North involves ensuring the quality reproduction of forest resources. The main parts of silvicultural production are procurement and preparation of seeds; growing planting stock, creation of new stands and agricultural tending of them. The goal of the federal project “Forest Conservation” is to ensure the balance of forest felling and reproduction in the ratio of 100 % by 2024. The emphasis is on the use of ball-rooted planting stock for artificial reforestation. Information gap on the long-term prospects of its use, as well as the lack of data on the results of long-term observations of growth and condition of forest crops created by seedlings with a lump of substrate, and comparison of such seedlings with traditional planting stock, especially in northern conditions, update the topic of research. The research purpose is to identify conditions for obtaining high-quality planting stock, as well as to assess the possibility of successful restoration of pine on felling sites in the north of the European part of Russia by creating forest crops using regional intensive technologies, based on the results of long-term technologies. The main objects of observations are nurseries of the region, the procedures used in them and the experimental planting of pine trees in the Kargopol and Arkhangelsk forestries in 2000–2001. Preservation, diameter, height, and volume were determined in dynamics in the areas of crops created from various types of planting stock (seedlings, plantlet, ball-rooted planting stock). The counts were carried out with several repetitions and dividing plants into healthy, weak and dry. Wood flaws of pine trunks were also noted and natural regeneration was recorded. Based on the research materials, the possibility of successful restoration of pine trees on felling sites in the north of the European part of Russia is shown using regional intensive technologies for the production of various planting stock and the creation of forest crops. This will reduce the period of transfer of young trees to natural conditions and increase the productivity of plantations. Comparison of average diameters and heights for all accounting periods indicates the influence of the type of planting stock and density of planting on the growth and development of trees. During the observation period, plantlets lead in all respects. Their height and diameter is 20–44 % higher than that of yearling seedlings, and in terms of stem volume the difference with other types of planting stock reaches 1.9–2.9 times.

For citation: Mochalov B.A., Bobushkina S.V. Silvicultural Production as a Basis for Continuity of Forest Management. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 80–96. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-80-96

Funding: The paper is based on the results of research carried out within the framework of the state assignment of the Federal Forestry Agency “Northern Research Institute of Forestry” for applied scientific research.

Keywords: seeds, planting stock, bare-rooted seedlings, ball-rooted seedlings, plantlet, nursery, greenhouse, forestry crops, soil preparation.

УДК 634.0.228.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-97-106

РОСТ И СОСТОЯНИЕ СМЕШАННЫХ ДРЕВОСТОЕВ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ КАМЕННОЙ СТЕПИ

В.И. Турусов, д-р с.-х. наук, акад. РАН; ResearcherID: [AAK-4220-2021](https://orcid.org/0000-0002-5853-9549),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5853-9549>

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

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

А.А. Лепёхин, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-4216-2021](https://orcid.org/0000-0002-3847-1161),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3847-1161>

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева, д. 81, кв. V, пос. 2-го участка Института им. В.В. Докучаева, Таловский р-он, Воронежская обл., Россия, 397463; e-mail: niish1c@mail.ru

Аннотация. К настоящему времени в Центрально-Черноземной зоне России накоплен богатый экспериментальный материал в области защитного лесоразведения, позволяющий судить об устойчивости и долговечности различных деревьев и кустарников в разной экологической обстановке. Хороший рост и высокая жизнеспособность древесной растительности во многом зависят от условий произрастания и определяются в первую очередь взаимоотношениями между биологическими видами (особями внутри вида) при их размещении на лесокультурной площади и типом местности. Цель исследования – изучить рост и санитарное состояние защитных лесных насаждений с различным сочетанием в схемах смешения деревьев и кустарников и неодинаковым расположением по типам местности. Исследование проведено в спелых (115–118-летние) лесных полосах, заложенных служащими Каменно-Степного опытного лесничества Г.Ф. Морозовым и Н.А. Михайловым на территории Каменной Степи (Воронежская обл., Таловский р-н). Привлечены архивные материалы, научные работы авторов статьи и сотрудников отдела агролесомелиорации. В насаждениях, созданных по древесно-кустарниковому типу смешения в разных условиях местности, выявлено превышение биометрических показателей древесных пород, произрастающих на плакорном типе местности, над соответствующими характеристиками образцов со склона. Показано, что первоначальный процент участия дуба черешчатого является значительным, но не всегда решающим фактором при создании дубовых насаждений. Их можно получить и при меньшей доле этого вида в культуре, однако в этом случае первостепенное значение будут иметь своевременные рубки ухода. С течением времени наблюдаются значительные изменения состава насаждений, числа деревьев и их таксационных показателей. В верхнем ярусе не осталось жизнеспособных экземпляров ясеня обыкновенного и вяза. Они сильно повреждены стволовыми вредителями. Определенные виды деревьев повреждаются следующими вредителями: ясень обыкновенный – большим и малым ясеневыми лубоедами; ильмовые породы – заболонниками (большим ильмовым, или разрушителем, струйчатым и пигмеем); дуб черешчатый – дубовой бронзовой и узкотелой златками, осовидным дубовым усачом, дубовым пестрым усачом и дубовым заболонником. Преобладающее количество образцов всех древесных пород относится к категориям ограниченно жизнеспособных и нежизнеспособных.

Для цитирования: Турусов В.И., Чеканышкин А.С., Лепёхин А.А. Рост и состояние смешанных древостоев лесных насаждений Каменной Степи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 97–106. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-97-106

Ключевые слова: защитные лесные насаждения, смешанный древостой, смешение древесных пород, тип растительных условий, лесопатологическое состояние, Каменная Степь.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there is no conflict of interest

Введение

Защитные лесные насаждения являются одним из важнейших факторов экологической оптимизации агроландшафта, отличаясь при этом от многих других его компонентов ярко выраженной динамичностью состояния. Эффективно выполнять свои функции им позволяют устойчивость и долговечность. Изучение таких насаждений отечественными и зарубежными учеными показало, что качественно реализуют мелиоративные функции те лесополосы, которые имеют хорошие рост и состояние [6, 8, 12, 13, 15, 17–20]. Данные параметры во многом зависят от условий произрастания. К существенным факторам здесь относятся взаимоотношения биологических видов (особей внутри вида), размещенных на лесокультурной площади, и тип местности.

В Каменной Степи уже более 125 лет изучаются процессы, протекающие в степных древостоях, где необходимо выявление на основе анализа влияющих на структуру насаждения закономерностей формирования его состава. При создании лесных полос использованы деревья и кустарники различных видов с неодинаковым сочетанием их в схемах смешения. Среди пород насаждений разных периодов создания преобладает дуб черешчатый, имеющий преимущество в устойчивости и долговечности [14]. Типы местности также разнообразны: плакорный – 2811 га (45,3 %); междуречный недренированный – 2314 га (37,3 %); склоновый – 1080 га (17,4 %). Данные типы были выделены на территории землепользования Научно-исследовательского института сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева сотрудниками под руководством Ф.Н. Милькова [7].

Цель исследования – изучить рост и лесопатологическое состояние защитных древостоев разнообразного видового состава с неодинаковым сочетанием в схемах смешения деревьев и кустарников и расположением их по типам местности.

Объекты и методы исследования

Таксационные работы и лесопатологические обследования проведены в лесных полосах на территории Каменной Степи (Воронежская обл., Таловский р-н) с использованием архивных материалов, научных работ авторов статьи и сотрудников отдела агролесомелиорации.

Объектами исследования послужили спелые (115–118-летние) лесные полосы, заложенные Г.Ф. Морозовым и Н.А. Михайловым на площадках Каменно-Степного опытного лесничества.

Изучение роста древесных пород и оценка их лесопатологического состояния осуществлялись с применением методик и инструктивных указаний [1, 2, 4, 9, 10]. Выполнен сплошной пересчет деревьев с замером их высоты, диаметра на высоте 1,3 м от шейки корня и протяженности кроны с вычислением площади ее проекции. Определено общее лесопатологическое состояние каждого дерева: ЖС – жизнеспособные деревья (условно здоровые и ослабленные листогрызущими вредителями); ОЖ – ограниченно жизнеспособные (пораженные стволовыми вредителями и гнилями, поперечным раком, с существенными травмами ствола и суховершинные); НЖ – нежизнеспособные (с явными признаками отмирания в кроне и по стволу); ЛО – лесной отпад (отмершие в различные сроки).

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительный анализ материалов лесочетных работ, проведенных в 2019 г., показал, что у всех видов древесных пород, произрастающих в изучаемых лесных полосах на разных типах местности, есть различия в росте и развитии. Так, на плакорном типе в лесных полосах № 63, 75, 77, заложенных Н.А. Михайловым в 1902–1904 гг. по древесно-кустарниковому типу смешения с размещением 1,5×0,7 м, средняя высота деревьев дуба черешчатого в 1-м ярусе составляет 25,6 м, а диаметр ствола – 38,7 см, что больше соответственно на 2,5 м и 4,8 см, чем в насаждениях № 63, 77, 78 на склоне. У дуба черешчатого на плакоре по сравнению с дубом черешчатым на склоне ниже напряженность роста, рассчитанная по отношению высоты к площади поперечного сечения ствола на высоте 1,3 м [3], а протяженность кроны и площадь ее проекции, наоборот – выше (табл. 1).

Таблица 1

**Биометрические показатели древесных пород на разных типах местности
(возраст 115–117 лет)**

Порода	Тип местности							
	Плакорный				Склоновый			
	N, шт./га	Напря- женность роста	Крона		N, шт./га	Напря- женность роста	Крона	
			L, м	S, м ²			L, м	S, м ²
<i>1-й ярус</i>								
Д	135	1,3	15,5	22,2	180	2,3	14,3	18,1
Я _о	25	2,3	17,4	26,1	8	1,8	12,5	23,9
В	15	3,2	9,3	21,8	4	2,4	5,3	20,8
К _о	10	1,8	12,7	16,4	4	2,2	10,5	12,3
<i>2-й ярус</i>								
Д	70	3,8	11,0	6,7	24	3,9	8,4	4,3
Я _о	25	5,9	9,5	4,8	8	6,4	6,3	1,8
В	12	6,2	6,3	9,8	20	4,0	3,5	4,7
К _о	51	8,3	7,4	9,8	16	12,2	5,6	3,6

Примечание: N – число деревьев, L – протяженность кроны, S – площадь проекции кроны.

Для роста в высоту ясеня обыкновенного лучшим следует считать плакорный тип местности – средняя высота деревьев составляет 24,8 м, что на 3,5 м выше, чем у образцов на склоне, где, однако, больше диаметр ствола – на 2,1 см – и меньше напряженность роста.

Средняя высота вяза в древостоях на плакорном типе местности составляет 22,6 м, а диаметр ствола – 34,7 см, что превышает биометрические показатели данной породы в насаждениях склонового типа местности на 1,5 м и 3,4 см соответственно при меньшей напряженности роста и большей протяженности кроны.

Клен остролистный в насаждениях на плакорном типе местности имеет более широкую и лучше развитую крону, его средняя высота –

на 2,4 м (23,1 м) – и диаметр ствола – на 2,0 см (36,2 см) выше по сравнению с деревьями склонового типа местности. Следует отметить: клены 2-го яруса значительно по высоте, чем другие породы, успешно занимают свободное место в древостое и, возможно, появятся в 1-м ярусе насаждений.

В качестве объекта исследований по изучению роли подгонов для дуба черешчатого нами взята полезащитная приводораздельная лесная полоса № 41, заложенная в 1901 г. Г.Ф. Морозовым в совершенно однородных условиях в направлении с севера на юг на типичном среднемощном черноземе. Посадка культур осуществлялась саженцами под клиновидную лопату. Густота – 12 483 шт./га. Расстояние между рядами – 142 см, в ряду – 71 см. Насаждение состоит из участков «а», «б», «в» длиной по 130,0 м и шириной по 106,7 м. На них испытаны 3 типа смешения древесно-кустарниковых пород в целях изучения влияния на насаждения одних и тех же пород при различном размещении их в цикле.

Участок «а» заложен по ильмово-подгоночному типу (нормальный тип): вяз – дуб черешчатый – вяз – ясень обыкновенный – вяз – груша лесная. Участие дуба, ясеня и груши – по 16,7 %, ильмовых – 50,0 %.

Участок «б» заложен по однокустарниковому типу: вяз – жимолость татарская – дуб черешчатый – жимолость татарская – вяз – груша лесная – клен ясенелистный – жимолость татарская – дуб черешчатый – жимолость татарская – клен ясенелистный – ясень обыкновенный. Доля дуба, клена ясенелистного и вяза составляла по 16,7 %, груши и ясеня обыкновенного – по 8,3 %, жимолости – 33,3 %.

Участок «в» представлен насаждением с двухкустарниковым типом. В схему входят те же породы, что и на участке «б», с дополнительным введением высокорослого кустарника клена татарского. Чередование пород осуществлено поперечными рядами: вяз – клен татарский – жимолость татарская – дуб черешчатый – жимолость татарская – клен татарский – вяз – груша лесная – клен ясенелистный – клен татарский – жимолость татарская – дуб черешчатый – жимолость татарская – клен татарский – клен ясенелистный – ясень обыкновенный. Участие дуба, вяза и клена ясенелистного – по 12,5 %, груши и ясеня обыкновенного – по 6,3 %, жимолости и клена татарского – по 25,0 %.

Осенью 1908 г. Н.А. Михайлов детально исследовал состояние 8-летних культур на всех трех опытных участках лесной полосы № 41. Анализируя собранный материал, ученый так оценил рост дуба:

«1) в нормальном типе замечается замедление роста, несмотря на начатые уже осветления; возможно, что осветление было слабо; но более сильное осветление было опасно от вторжения травяного покрова, кроме того, подгон пришлось бы калечить, т. е. срубить его вершины; пока же дело ограничилось обрезкой боковых сучьев. Итак, нормальный тип дал наихудшие результаты.

2) в однокустарниковом типе дело обстоит совершенно иначе; здесь мы имеем наилучшие результаты. Но с вязовым подгоном все-таки рост дуба хуже, чем с кленом американским.

3) двухкустарниковый тип занимает среднее положение между предыдущими; но и здесь с кленом американским рост лучше, чем с вязом» [16, с. 109].

В дальнейшем осуществлялся уход за насаждением, главным образом санитарные рубки и низовые прореживания. Надежды Н.А. Михайлова на однокустарниковый тип, который исследователь считал лучшим, не оправдались. Ко времени 1-й таксации (1936 г.) на всех участках в составе древостоя господствующее

положение (70–90 %) занял ясень обыкновенный, который после вырубki ильмовых быстро обогнал по высоте остальные породы, вытеснив их из верхнего полога [5]. Доля дуба черешчатого в верхнем ярусе насаждений участков «а» и «б» составила 10 %, участка «в» – 20 %. Средняя высота деревьев 1-го яруса на всех участках была одинаковой – 17,0 м, а средний диаметр на участке «б» и «в» превышал этот показатель на участке «а» на 1,5 см. Средний объем дерева на участке «а» (0,18 м³) меньше, чем на «б» и «в» (0,22 м³), но на участке «а» в связи с большей густотой насаждения сформирован больший запас древесины (табл. 2).

Таблица 2

Таксационная характеристика лесной полосы № 41

Год учета	Участок	Ярус	Состав	<i>N</i> , шт./га	<i>D</i> , см	<i>S</i> , м ² /га	<i>V</i> , м ³ /га
1936 [5]	а	I	9Я ₀ 1Д+В	1011	16,5	21,6	187,0
		II	Гр, В, Д	–	6,0	–	–
	б	I	8Я ₀ 1Д1К _{яс} +В	754	18,0	19,2	166,0
		II	В, Гр, Д	–	6,0	–	–
	в	I	7Я ₀ 2Д1В+К _{яс}	786	18,0	20,0	173,0
		II	В, Гр, Д	–	8,0	–	–
1962 [11]	а	I	8Я ₀ 2Д	345	25,5	17,6	192,3
		II	7Я ₀ 2Д1В	117	23,6	5,2	46,7
	<i>Сумма</i>			462	25,0	22,8	239,0
	б	I	8Я ₀ 2Д	183	30,4	12,7	143,5
		II	10Д	83	22,6	3,3	29,1
	<i>Сумма</i>			266	28,0	16,0	172,6
	в	I	6Д4Я ₀	283	30,3	20,4	232,2
		II	7Д2В1Я ₀	55	27,6	3,3	28,1
	<i>Сумма</i>			338	29,9	23,7	260,3
2019	а	I	6,5Я ₀ 3,5Д	149	42,4	22,0	267,0
		II	6,4Я ₀ 3,6Д	50	34,8	5,2	54,5
	<i>Сумма</i>			199	40,4	27,2	321,5
	б	I	10Я ₀	73	52,5	16,1	207,8
		II	4,7Д4,2Я ₀ 0,8В0,3К ₀	57	37,6	7,4	74,1
	<i>Сумма</i>			130	45,8	23,5	281,9
	в	I	6Д4Я ₀ ед.В	167	50,9	34,8	435,0
		II	3,8Д4,3В1,6Я ₀ 0,3К ₀	127	26,4	7,4	80,4
	<i>Сумма</i>			294	45,8	42,2	515,4

Примечание: *D* – средний диаметр ствола, *S* – сумма площадей поперечного сечения, *V* – общий запас древесины.

В последующие 26 лет проходными рубками ухода было удалено более половины деревьев: в первую очередь отмершие и нежизнеспособные, а также угнетающие рост дуба черешчатого. Подобные мероприятия, проведенные в период интенсивного роста дуба черешчатого и ясеня обыкновенного, обусловили

следующее распределение средних объемов деревьев: на участке «а» – 0,52 м³, на участке «б» – 0,65 м³ и на участке «в» – 0,78 м³. То есть, чем шире междурядья, тем лучше рост.

С 1936 по 1962 г. были полностью удалены клен ясенелистный и груша лесная, и в возрасте 60 лет 1-й ярус насаждений на участках «а» и «б» имел одинаковый породный состав – 8Я₀2Д, среднюю высоту – 23,2 м и превышение среднего диаметра ствола на 4,9 см на участке «б», где густота древостоя оказалась меньше в 1,9 раза [11]. На участке «в» при составе 1-го яруса 6Д4Я₀ средняя высота деревьев – 24,3 м, что на 1,1 м выше по сравнению с участками «а» и «б»; средний диаметр деревьев на участке «б» (30,3 и 30,4 см) почти равен этому показателю на участке «а» (больше на 4,8 см).

В настоящее время в 118-летнем насаждении (по состоянию на 2019 г.) число деревьев в среднем составляет 208 шт./га, или 1,7 % от первоначального количества посадочных мест. Лучшая сохранность – 294 дер./га – отмечается на участке «в», где в составе древостоя преобладает дуб и зафиксирован наибольший запас древесины – 515,4 м³/га (табл. 2). Данные о современном составе насаждений показывают, что первоначальный процент участия дуба черешчатого не всегда является решающим фактором при создании дубовых насаждений: они могут быть получены и при меньшей доле этого дерева в культуре, но в таком случае крайне важны своевременные рубки ухода.

На основании анализа модельных деревьев дуба черешчатого 118-летнего возраста установлено, что в первые 10 лет прирост в высоту можно характеризовать как умеренный, в 10...40 лет – как хороший, при средней величине 49 см в год. На 41–60-й год текущий прирост изменялся от 30 до 40 см, а на 61–80-й год уменьшился до 20 см, в спелом возрасте (свыше 80 лет) составлял в среднем 10 см, изменяясь по годам от 7 до 15 см.

Прирост по диаметру ствола наиболее интенсивно – 0,48 см (3,7 %) в год – проходил в период 10–40 лет и в приспевающем возрасте (61–80 лет) – 0,41 см (1,6 %). В остальные периоды развития дуба черешчатого этот показатель уменьшался от 0,33 до 0,21 см в год. Максимальный прирост по объему ствола приходится на 60–90 лет – 3,1 %, с последующим снижением до 2,1 %.

Рассматривая лесопатологическое состояние 1-го яруса насаждений на опытных участках, следует отметить, что максимальное количество деревьев, наибольшая сумма площадей поперечного сечения и наименьшая доля участия нежизнеспособных образцов и лесного отпада по сумме площадей поперечного сечения наблюдаются на участке «в» (табл. 3).

В верхнем ярусе древостоев не осталось жизнеспособных деревьев ясеня обыкновенного и вяза (они в сильной степени подвержены атакам стволовых вредителей). Первый из них повреждается большим и малым ясеневыми лубоедами. Ильмовые породы заселены заболонниками: большим ильмовым, или разрушителем, струйчатым и пигмеем. На ослабленных экземплярах дуба черешчатого размножаются следующие стволовые вредители: дубовые бронзовая и узкотелая златки, осовидный дубовый усач, дубовый пестрый усач и дубовый заболонник.

Таблица 3

Лесопатологическое состояние деревьев 1-го яруса в лесной полосе № 41 (2019 г.)

Участок	Порода	N, шт./га	S, м ² /га	В том числе по категориям состояния, %			
				ЖС	ОЖ	НЖ	ЛО
а	Д	51	7,7	23,3	58,8	14,6	3,3
	Я _о	98	14,3	0	11,8	70,3	17,9
	Сумма	149	22,0	8,1	28,2	50,9	12,8
б	Я _о (сумма)	73	16,1	0	40,6	41,7	17,7
в	Д	101	20,9	7,2	72,5	17,1	3,2
	Я _о	63	13,1	0	37,6	46,1	16,3
	В	3	0,8	0	100,0	0	0
	Сумма	167	34,8	4,3	60,1	27,6	8,0

Преобладающее количество деревьев всех пород относится к категориям ограниченно жизнеспособных и нежизнеспособных, суммарно составляя на участке «а» – 79,1 %, на участке «б» – 82,3 % и на участке «в» – 87,7 %.

Заключение

Таким образом, сравнительный анализ материалов лесоучетных работ, проведенных в защитных лесных насаждениях, созданных по древесно-кустарниковому типу смешения на местности с разными особенностями, выявил улучшенные биометрические показатели древесных пород, произрастающих на плакорных участках, по сравнению с насаждениями на склоне.

Исследования роли подгонов из деревьев и кустарников по отношению к дубу черешчатому показывают, что первоначальный процент его участия в насаждении не всегда играет первостепенную роль. Получение древостоев дуба возможно и при меньшей доле этого вида в культуре. Однако в таком случае необходимо регулярное проведение рубок ухода. С течением времени наблюдается значительная изменчивость состава насаждений, числа деревьев и их таксационных показателей. В верхнем ярусе не осталось жизнеспособных экземпляров ясеня обыкновенного и вяза. Они в сильной степени повреждены стволовыми вредителями. Почти все древесные породы представлены образцами, относящимися к категориям ограниченно жизнеспособных и нежизнеспособных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.
Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.
2. Артюховский А.К., Харченко Н.А., Быков Н.А., Арефьев Ю.Ф. Экологические основы лесозащиты в насаждениях зеленых зон. Воронеж: ВГУ, 1994. 128 с.
Artyukhovskiy A.K., Kharchenko N.A., Bykov N.A., Aref'yev Yu.F. *Ecological Basics of Forest Protection in Plantations of Green Areas*. Voronezh, VGU Publ., 1994. 128 p.
3. Высоцкий К.К. Закономерности строения смешанных древостоев. М.: Гослесбумиздат, 1962. 177 с.

Vysotskiy K.K. *Patterns of the Structure of Mixed Stands*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 177 p.

4. Дударев А.Д., Гладышева Н.В., Лозовой А.Д. Методика и техника работ на пробных площадях. Воронеж, 1978. 80 с.

Dudarev A.D., Gladysheva N.V., Lozovoy A.D. *Methods and Techniques of Operation on Trial Plots*. Voronezh, 1978. 80 p.

5. Ключников Ю.В. Таксационное описание 1936 года (приложение к «Описанию лесонасаждений Каменно-Степного оазиса»). Воронеж: Воронеж. обл. книгоизд-во, 1940. 164 с.

Klyuchnikov Yu.V. *Mensurational Description of 1936 (Appendix to the "Description of Forest Plantations of the Kamennaya Steppe Oasis")*. Voronezh, Voronezhskoye oblastnoye knigoizdatel'stvo, 1940. 164 p.

6. Манаенков А.С. Закономерности водного режима, роста и долговечности искусственных древостоев в засушливых условиях // Изв. СПбЛТА. 2017. Вып. 221. С. 91–106.

Manaenkov A.S. The regularities of Water Regime, Growth and Longevity of Artificial Forest Stands in Dry Conditions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2017, iss. 221, pp. 91–106. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2017.221.91-106>

7. Мильков Ф.Н., Нестеров А.И., Петров Н.Г., Гончаров М.В. Каменная Степь (Опыт ландшафтно-типологической характеристики). Воронеж: ВГУ, 1971. 176 с.

Mil'kov F.N., Nesterov A.I., Petrov N.G., Goncharov M.V. *Kamennaya Steppe (Experience of Landscape-Typological Characteristics)*. Voronezh, VGU Publ., 1971. 176 p.

8. Михин В.И. Лесомелиорация ландшафтов: моногр. Воронеж: ВГЛТА, 2006. 127 с.

Mikhin V.I. *Forest Reclamation of Landscapes: Monograph*. Voronezh, VGLTA Publ., 2006. 127 p.

9. Наставление по организации и ведению лесопатологического мониторинга в лесах России. М.: ВНИИЛМ, 2001. 86 с.

Manual on Organization and Management of Forest Pathology Monitoring in the Forests of Russia. Moscow, VNIILM Publ., 2001. 86 p.

10. Павловский Е.С. Таксационное описание лесных насаждений Каменной Степи (1952 г.). Воронеж: Коммуна, 1954. 315 с.

Pavlovskiy E.S. *Mensurational Description of Forest Plantations of the Kamennaya Steppe (1952)*. Voronezh, Kommuna Publ., 1954. 315 p.

11. Павловский Е.С. Таксационное описание лесных насаждений Каменной Степи (1962 г.). Воронеж: Коммуна, 1964. 324 с.

Pavlovskiy E.S. *Mensurational Description of Forest Plantations of the Kamennaya Steppe (1962)*. Voronezh, Kommuna Publ., 1964. 324 p.

12. Павловский Е.С. Экологические и социальные проблемы агролесомелиорации. М.: Агропромиздат, 1988. 182 с.

Pavlovskiy E.S. *Ecological and Social Problems of Agroforestry*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 182 p.

13. Саяткина М.Ю., Кузнецова Н.Ф., Тунякин В.Д. Современное состояние защитных лесных полос с преобладанием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в Каменной Степи // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2018. № 1. С. 78–89.

Sautkina M., Kuznetsova N., Tunjakin V. Current State of Forest Shelter Belts with Predominance of Oak (*Quercus robur* L.) in the Stone Steppe. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2018, no. 1, pp. 78–89. DOI: <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.07>

14. Скачков Б.И. Состояние и долговечность лесокультурных ландшафтов // Каменная Степь: лесоаграрные ландшафты / [Ф.Н. Мильков, П.Г. Петров, А.И. Нестеров и др.]; под ред. Ф.Н. Милькова. Воронеж: ВГУ, 1992. С. 48–63.

Skachkov B.I. Condition and Longevity of Silvicultural Landscapes. *Kamennaya Steppe: Forest and Agrarian Landscapes*. Voronezh, VGU Publ., 1992, pp. 48–63.

15. Чеканышкин А.С. Лесные полосы – экологический каркас агроландшафтов Черноземья // Биосферное хозяйство: теория и практика. 2019. № 7(16). С. 9–13.

Chekanyshkin A.S. Forest Strips – Ecological Framework for Agrolandscapes of Black Earth. *Biosfernoye khozyaystvo: teoriya i praktika*, 2019, no. 7(16), pp. 9–13.

16. Шаповалов А.А., Павловский Е.С. Лесокультурные работы Г.Ф. Морозова по созданию защитных лесных полос // Лесные полосы Каменной Степи: сб. ст. / отв. ред. И.К. Винокурова. Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд-во, 1967. С. 93–144.

Shapovalov A.A., Pavlovskiy E.S. Silvicultural Works of G.F. Morozov on Creation of Protective Forest Strips. *Forest Strips of the Kamennaya Steppe: Collection of Academic Papers*. Ed. by I.K. Vinokurova. Voronezh, Tsentral'no-Chernozemnoye knizhnoye izdatel'stvo, 1967, pp. 93–144.

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

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

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

20. Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Culdberg O., Bairlein F. Ecological Responses to Recent Climate Change. *Nature*, 2002, vol. 416, no. 6879, pp. 389–395. DOI: <https://doi.org/10.1038/416389a>

GROWTH AND STATE OF MIXED STANDS OF FOREST PLANTATIONS OF THE KAMENNAYA STEPPE

Victor I. Turusov, Doctor of Agriculture, Academician of RAS; ResearcherID: [AAK-4220-2021](https://orcid.org/0000-0002-5853-9549), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5853-9549>

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

Alexandr A. Lepikhin, Candidate of Biology, Leading Research Scientist; ResearcherID: [AAK-4216-2021](https://orcid.org/0000-0002-3847-1161), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3847-1161>

Research Institute of Agriculture of the Central Black Soil Strip named after V.V. Dokuchaev, 81, kv. V, pos. 2-go uchastka Instituta im V.V. Dokuchaeva, Talovskiy District, Voronezh Region, 397463, Russian Federation; e-mail: niish1c@mail.ru

Abstract. By now, a vast amount of experimental material has been accumulated in the field of protective afforestation of the Central Chernozem Region of Russia, which allows estimating the stability and longevity of various trees and shrubs in different environmental conditions. Good growth and high vitality of woody vegetation largely depend on growing conditions and are determined primarily by the relationship between species (individuals within a species) when they are placed in the forest area and the type of terrain. The research

purpose is to examine the growth and sanitary condition of protective forest plantations with different combinations in tree and shrub mixing schemes and unequal location by types of terrain. The study was carried out in mature (115–118-year-old) forest strips laid out by the staff of the Kamennaya Steppe experimental forestry G.F. Morozov and N.A. Mikhailov on the territory of the Kamennaya Steppe (Voronezh region, Talovsky district) using archival materials, scientific works of the authors of this article and the employees of the Department of Agroforestry. A comparative analysis of the materials of forest survey work carried out in protective forest plantations created according to the tree-shrub type of mixing on different types of terrain revealed an excess of biometric indicators of tree species growing on the upland type of terrain over those on the slope. It is shown that the initial percentage of participation of English oak is a significant, but not always decisive factor in the creation of oak plantations. They can also be grown with a smaller proportion of this species in the culture, but in this case, timely thinning will be of paramount importance. Over time, there have been significant changes in the composition of plantations, the number of trees and their valuation indicators. There are no viable ash and elm specimens left in the upper tier of the stands. They are severely damaged by stem pests. Certain tree species are damaged by the following pests: common ash by large ash bark beetle (*Hylesinus crenatus*) and ash bark beetle (*Hylesinus fraxini*); elm species by cambium-feeding beetles (large elm bark beetle (*Scolytus scolytus*), European elm bark beetle (*Scolytus multistriatus*), and pygmy elm bark beetle (*Scolytus pygmaeus*); English oak by gold pit oak splendour beetle (*Chrysobothris affinis*), oak borer (*Agrilus angustulus*), longhorn beetle (*Plagionotus detritus*), and European oak bark beetle (*Scolytus intricatus*). The predominant number of trees of all tree species belongs to the categories of limited viable and inviable.

For citation: Turusov V.I., Chekanyshkin A.S., Lepekhin A.A. Growth and State of Mixed Stands of Forest Plantations of the Kamennaya Steppe. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 97–106. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-97-106

Keywords: protective forest plantations, mixed stand, mixing of tree species, type of vegetation conditions, forest pathological condition, Kamennaya Steppe.

УДК 630*232.411.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-107-116

БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА КАК ТЕСТ-ПОКАЗАТЕЛЬ УСПЕШНОСТИ КУЛЬТУР *Pinus silvestris* L.

Н.Р. Сунгурова, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: H-1847-2019.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

А.А. Дрочкова, аспирант; ReseracherID: H-1869-2019.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3503-5767>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: nsungurova@yandex.ru, annadrochkova@gmail.com

Аннотация. Создание и выращивание искусственных насаждений хвойных пород во многом зависит от качества посадочного материала. Работа посвящена изучению взаимосвязи основных характеристик посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) с таксационными показателями формирующихся искусственных насаждений. Исследованы опытные лесные культуры сосны обыкновенной в Архангельской области, созданные в долгомошном типе условий местопроизрастания. Для постановки опыта сеянцы сосны обыкновенной, имеющие стандартные размеры, по диаметру у шейки корня разделили на крупные, средние, мелкие. Цель исследования определила главную задачу – установить, из каких растений закладываются «деревья будущего» – быстрорастущие крупные экземпляры. Показано, что особи, выращиваемые из значительных по размеру сеянцев, имеют наибольшую высоту. По отношению к растениям, формирующимся из среднего и мелкого посадочного материала, это различие сохраняется и постепенно увеличивается. С начальных фаз развития в исследуемом насаждении устанавливается своего рода подвижное равновесие. Все деревья растут очень быстрыми темпами, но первоначальные (на момент посадки на лесокультурную площадь) размеры посадочного материала продолжают определять размеры соответствующих выживших в разные годы в культурах растений сосны. Установлено, что из крупных сеянцев к концу 2-го класса возраста выросло наибольшее число лидеров (47 % из всех сохранившихся). Следовательно, качественная обработка почвы совместно с использованием высококачественного пропорционально развитого посадочного материала существенно повышает таксационные показатели растений в древостое, позволяет на 15–20 лет раньше получить целевые сортименты.

Для цитирования: Сунгурова Н.Р., Дрочкова А.А. Биометрические характеристики посадочного материала как тест-показатель успешности культур *Pinus silvestris* L. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С.107–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-107-116

Ключевые слова: искусственные насаждения, сосна, лесные культуры, сеянцы, продуктивность древостоев, качество посадочного материала.

Введение

Ведущим функциональным фактором, организующим и контролирующим процесс образования и развития лесного насаждения, является конкурентная борьба за существование, за средства жизни между входящими в его состав организмами. Возникает необходимость в концентрации внимания ученых и работников лесной промышленности на начальных фазах развития древостоев, когда особенно велика значимость и эффективность хозяйственных мер, характеризующихся наименьшими затратами.

Основными требованиями к качеству используемого на вырубках посадочного материала при создании лесных культур считаются быстрый рост и устойчивость к внешним факторам. Е.Л. Маслаков в своих исследованиях [2] пришел к выводу, что отбор и выращивание элиты является одним из важнейших путей повышения продуктивности насаждений будущего, особенно в хозяйствах плантационного типа. Это растения «лидеры» и «сублидеры». Следовательно, селекцию лучших элитных деревьев возможно осуществлять в лесосеменных и питомнических хозяйствах. Повышение устойчивости посадок и их способности конкурировать с травянистой и древесной растительностью, стимулирование быстроты роста могут быть достигнуты равномерным размещением экземпляров на лесокультурной площади при оптимальной их густоте.

Ранее учеными составлены различные классификации для разделения деревьев в формирующихся молодняках по скорости роста. Е.Л. Маслаков [2], к примеру, предлагает использовать 5 категорий (классов роста): лидеры, сублидеры, спутники, отстающие, аутсайдеры.

В Пермском крае исследователи М.В. Рогозин, Г.С. Разин [8, 9, 22, 23] распределили модели растений в первые периоды роста в молодом древостое по диаметру стволика на 3 группы: тонкие, средние и толстые.

Существует и ряд других классификаций, например: по классам продуктивности Б.Д. Жилкина, по положению деревьев в пологе древостоя Крафта и т. д.

Ученые из Польши [10, 24], проведя многочисленные исследования, пришли к выводу, что, используя рассортированные перед посадкой сеянцы и саженцы, можно на 5–10 % увеличить рост культур 1-го класса возраста. Сотрудниками лаборатории лесных культур Архангельского института леса и лесохимии (сейчас – Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства) [5] разработан метод комплексной оценки качества посадочного материала. Предложены критерии его разбиения на группы по относительной массе как основной характеристике продуктивности одновозрастных сеянцев, т. е. по отношению индивидуальной массы растения к средней массе анализируемой однородной совокупности. Б.А. Мочалов в своих рекомендациях [3] предлагает выбрать определенный показатель посадочного материала: или средний диаметр, или среднюю высоту для партии, или квадратичное отклонение от среднего значения, и все сеянцы рассортировать на мелкие, средние и крупные по выбранному критерию.

Подобные исследования скорости роста и законов развития естественных и искусственных древостоев проводятся отечественными и зарубежными учеными [7, 12–21].

Целью научного исследования является определение продолжительности влияния качества (размеров) посадочного материала на параметры деревьев сосны в лесных культурах, выращиваемых в северном лесном районе.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужили опытные лесные культуры сосны обыкновенной в северо-таежном районе Архангельской области, созданные в долгомошном типе условий местопроизрастания. Насаждения заложены сотрудниками лаборатории лесных культур Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства под руководством Ф.Т. Пигарева в 1978 г. Площадь

участка – 5 га. Технология создания: ручная посадка 2-летних сеянцев сосны по пластикам, подготовленным плугом ПКЛ-70-1. Густота посадки – 4000 шт./га.

Непосредственно перед посадкой согласно учетной ведомости растению присваивали номер, замеряли биометрические показатели (высоту, годичный прирост в высоту, диаметр корневой шейки). Во вновь созданных насаждениях на вырубке нумерация сохранялась, что позволило сопоставить состояние и рост растений в культурах с их биометрической характеристикой до посадки и применить методы математической статистики. Количество сеянцев в экспериментальных партиях варьировало в пределах 230...500 шт. [6]. В партиях, включавших в себя сеянцы сосны обыкновенной, созданные в однородных лесорастительных условиях, отмечаются сходные закономерности состояния и роста. В связи с этим в статье приводится анализ динамики биометрических показателей посадочного материала по одной партии, из которого в культурах разного возраста были получены выжившие растения. Первоначально высажено 232 шт. сеянцев сосны средней высотой 15,60 см и диаметром у шейки корня 4,33 мм. Всю совокупность размещенных на лесокультурной площади растений сосны обыкновенной в учетной ведомости разделили по диаметру у шейки корня на 3 группы: крупные ($D_{\text{у ш. к}} = 0,55\text{--}0,75$ см), средние ($D_{\text{у ш. к}} = 0,34\text{--}0,54$ см), мелкие ($D_{\text{у ш. к}} = 0,13\text{--}0,33$ см). Нахождение совокупностей деревьев сосны проводили также по диаметру (в 5-летних диаметр у шейки корня, далее – на высоте 1,3 м), разделяя весь массив полученных данных на 3 группы (крупные, средние, мелкие).

Результаты исследования и их обсуждение

Проведен анализ изменения биометрических показателей посадочного материала, соответствующего выжившим растениям в культурах разного возраста (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика посадочного материала, соответствующего выжившим растениям сосны в культурах разного возраста

Возраст культур, лет	Количество, шт.	Высота, см	Диаметр, мм
		Среднее ± отклонение	
2	145	16,19±0,26	4,51±0,01
3	142	16,23±0,27	4,53±0,01
4	138	16,14±0,26	4,46±0,01
5	137	16,14±0,26	4,45±0,01
6	134	16,22±0,26	4,44±0,01
7	131	16,25±0,26	4,50±0,01
8	131		
9	131		
10	131		
11	130	16,27±0,26	4,55±0,01
12	130		
36	126	16,18±0,26	4,58±0,01

В ходе исследований установлено, что в фазах приживания и индивидуального роста не выдерживают конкуренцию чаще всего мелкие и средние растения. По средней высоте различия у посадочного материала до посадки и в 10–12-летнем возрасте достоверны (при $t_{05} = 2,0$) и коэффициент t равняется 2,1. Это подчеркивает необходимость регулирования фитоценологических факторов в сосновых культурах посредством проведения первого приема рубок ухода в данном возрастном периоде.

Делать вывод, что из крупного посадочного материала вырастают только крупные деревья, а из мелкого только мелкие, не представляется возможным. Анализ корреляционных зависимостей основных показателей роста посадочного материала и лесных культур показывает слабую связь, которая имеет тенденцию постоянного снижения и к концу 2-го класса возраста не превышает по высоте – 0,275, по диаметру – 0,246, по напряженности конкуренции – 0,247.

Далее сопоставим показатели роста деревьев сосны в различном возрасте с их биометрической характеристикой до посадки. Полученные экспериментальные данные (%) по количеству сформировавшихся из разных групп посадочного материала растений сведены в табл. 2, т. е. показано, какое количество мелких, средних и крупных деревьев было в разные возрастные периоды, например, из мелких семян и т. д. Также в табл. 2 приводится число (%) растений, погибших к возрасту 36 лет.

Таблица 2

Распределение деревьев сосны в культурах разного возраста по категориям крупности и размерам посадочного материала

Возраст культур, лет	Количество (%) деревьев сосны различного размера			Число погибших растений, %
	мелкие	средние	крупные	
<i>Мелкие семена</i>				
5	74	26	–	48
10	35	59	6	
12	23	71	6	
36	35	53	12	
<i>Средние семена</i>				
5	24	54	22	46
10	22	53	25	
12	14	58	28	
36	16	65	16	
<i>Крупные семена</i>				
5	9	64	27	28
10	9	64	27	
12	4	64	32	
36	5	58	47	

Наиболее незначительное количество мелких растений сосны во всех группах наблюдается в 12-летнем возрасте. Причем из крупных сеянцев сформировалось всего 4 % таких экземпляров, этот показатель в 6 раз ниже ($t = 13,47$ при $t_{0,5} = 2,0$), чем у мелких, и в 3,5 раза меньше ($t = 7,09$ при $t_{0,5} = 2,0$), чем у средних. Следовательно, именно в этом возрасте наиболее эффективно проводить первые лесоводственные уходы, направленные на лучшую организацию будущего насаждения и повышение его потенциальной производительности. При этом выборке должны подлежать угнетенные, больные, усыхающие, имеющие механические повреждения и явно мелкие растения с таким расчетом, чтобы к 10–12 годам выращивания искусственных молодняков на лесокультурной площади оставалось 2 тыс. шт. растений культивируемой породы.

Повысить продуктивность как отдельных особей, так и древостоя в целом позволяют оптимальные для каждого растения условия, что стабилизирует ранговую структуру культурфитоценоза. К концу 2-го класса возраста максимальное количество лидеров (47 %) отмечается в вариантах опыта, созданных из крупных сеянцев. Это свидетельствует о возможности при использовании отборного высокоэффективного посадочного материала наряду с качественной механической обработкой почвы значительно повысить темпы роста деревьев и раньше, примерно на один класс возраста, получить целевые сортименты.

Оказавшиеся в новых условиях произрастания сеянцы после акклиматизации начинают конкурировать друг с другом за питание, из-за наступления сорной травянистой растительности (в последующем и древесных нежелательных пород) и за лучшие световые условия, так необходимые сосновым особям. Следовательно, у мелких неконкурентоспособных растений отпад наибольший. Средние значения этого показателя у сеянцев разных групп при $t_{0,5} = 2,0$ достоверно различаются: у мелких и крупных $t = 17,70$; у мелких и средних $t = 10,33$; у средних и крупных $t = 7,02$.

Число погибших растений в различных возрастных группах колеблется. Исследования показали, что максимальное количество усохших особей (92 % от всех отпавших растений) выявлено в 1-й год после посадки на лесокультурную площадь. В дальнейшем чаще сказываются биологические особенности сосны обыкновенной: культурфитоценозы данной породы подвержены ветровалу и снеголому, что наблюдается в фазе формирования насаждения, т. е. в молодняках после смыкания крон [11]. У 10 % растений от общего числа сохранившихся культур отмечены данные повреждения.

Рассмотрим изменение основных таксационных показателей сосны в лесных культурах, обусловленное первоначальными размерами посадочного материала (рис. 1). Наибольшая средняя высота наблюдается у культур, созданных из крупных сеянцев. Причем динамика этих показателей у особей, отличающихся размером посадочного материала, прослеживается и идет в сторону увеличения. Например, в 10-летнем возрасте различия по средней высоте (при $t_{0,5} = 2,0$) достигают между мелкими и крупными сеянцами 1,3 раза ($t = 5,18$), средними и крупными – 1,2 раза ($t = 3,59$) в пользу лидеров; в 20 лет – 1,2 раза ($t = 2,98$) и 1,1 раза ($t = 2,08$); в 36 лет – 1,1 раза ($t = 4,30$) и 1,08 раза ($t = 3,05$) соответственно.

Лидеры и аутсайдеры в культурфитоценозах выделяются в 10 лет.

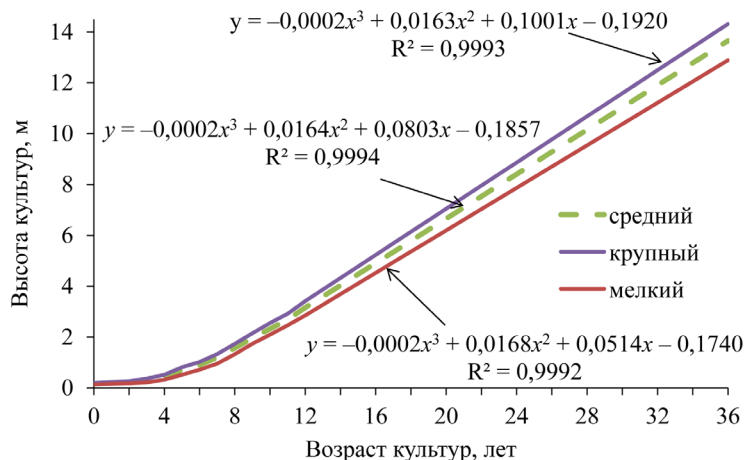


Рис. 1. Влияние размера посадочного материала на высоту культур сосны

Fig. 1. Influence of the planting material size on the height of pine trees

Вайс А.А. [1] при изучении пихтовых насаждений Средней Сибири установил, что динамика темпов роста основных таксационных показателей (высота, диаметр и запас) наблюдается до 60-летнего (а в некоторых случаях до 100-летнего) возраста в нормальных древостоях различного класса бонитета.

Динамика годичного прироста лесных культур по годам в зависимости от группы семян сосны представлена на рис. 2.

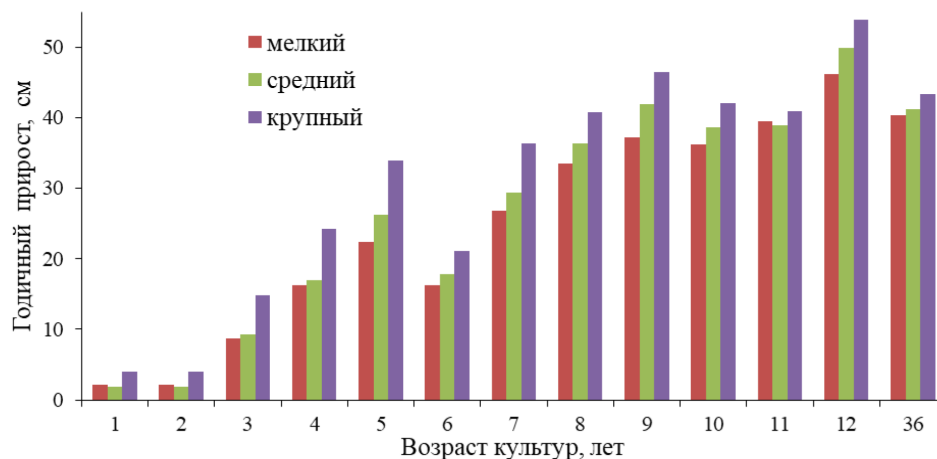


Рис. 2. Влияние размера посадочного материала на годичный прирост культур сосны

Fig. 2. Influence of the planting material size on the annual growth of pine trees

Наибольшим приростом по высоте в течение двух классов возраста характеризуются культуры, созданные крупным посадочным материалом. Деревья-лидеры надежно удерживают свои позиции в верхнем пологе насаждения. К 36 годам различия между средними показателями групп достоверны и составляют при $t_{05} = 2,0$: мелкие и крупные – $t = 3,48$; средние и крупные – $t = 2,56$.

С начальных фаз формирования исследуемого древостоя за короткий срок устанавливается своего рода подвижное равновесие. Все деревья развиваются очень быстрыми темпами (рис. 2), но первоначальные (на момент посадки на лесокультурную площадь) соотношения растений по размерам сохраняются.

Систематически доминирующие показатели роста по сравнению со средними темпами роста насаждения, а также нерегулярные колебания стохастической природы отражаются в изменении прироста отдельных особей. Данное заключение подтверждается и исследованиями Т.В. Нуревой и др. [4]. Индивидуальные возможности деревьев, отмечает Маслаков Е.Л. [2], ограничены. Лишь совсем небольшая их часть способна ускорить свой рост на 15–20 % от нормы. Только примерно равные по размеру экземпляры могут соревноваться по данному показателю. Однако вследствие случайного размещения по площади и большого уровня изменчивости соседство равных особей встречается редко. Крупные быстрорастущие экземпляры формируют верхний ярус насаждения, многократно увеличивая массу и абсолютную разницу в размерах. Постоянно отстающие деревья могут оказаться большими, генетически неполноценными и т. д.

Расчетные показатели роста деревьев сосны 2-го класса возраста в зависимости от размеров посадочного материала представлены в табл. 3.

Таблица 3

Рост сосны в культурах в 36-летнем возрасте при создании посадочным материалом различной крупности

Высота, м	Диаметр, см	Число деревьев, шт./га,	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
<i>Мелкий посадочный материал</i>				
12,9±0,44	14,2±0,53	2080	202	III
<i>Средний посадочный материал</i>				
13,1±0,48	15,7±0,68	2160	221	II
<i>Крупный посадочный материал</i>				
14,2±0,55	20,3±0,63	2880	264	II

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для закладки искусственных древостоев сосны эффективнее использовать средние и крупные экземпляры, а мелкие не брать. Соблюдение этого условия позволит значительно повысить темпы роста деревьев в насаждении и получить целевые сортименты на 1 класс возраста раньше.

Заключение

При закладке искусственных насаждений на этапе выбора посадочного материала целесообразнее использовать средний и крупный, а мелкие сеянцы необходимо отбраковывать. Соблюдение этого условия позволит существенно ускорить рост деревьев в насаждении, раньше на 15–20 лет получить целевые сортименты.

Раннюю, достаточно уверенную диагностику ценотического статуса деревьев, особенно лидеров и отстающих, в сосняках можно вести уже в возрасте 10–12 лет. С целью рационализации первичных структур популяции в это время рекомендуется проводить лесоводственные уходы и селекционные рубки. Причем выборке должны подлежать угнетенные, больные, усыхающие, имею-

щие механические повреждения и явно мелкие растения с таким расчетом, чтобы к 10–12 годам выращивания искусственных молодняков на лесокультурной площади оставалось 2 тыс. шт. растений культивируемой породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Вайс А.А.* Мониторинг таксационных показателей пихтовых насаждений Средней Сибири на основе таблиц хода роста // *Эпоха науки*. 2016. № 5. С. 74–78.

Wais A.A. Monitoring of Taxation Indicators of Cedar Plantings of Central Siberia on the Basis of Tables of the Course of Growth. *Эпоха науки* [Era of Science], 2016, no. 5, pp. 74–78.

2. *Маслаков Е.Л.* Структура и густота древостоев при плантационном лесовыращивании // *Выращивание и формирование высокопродуктивных насаждений в южной подзоне тайги*. Л.: ЛенНИИЛХ, 1984. С. 104–111.

Maslakov E.L. Structure and Density of Forest Stands in Plantation Forest Cultivation. *Cultivation and Formation of Highly Productive Plantations in the Southern Taiga Subzone*. Leningrad, LenNIILKh Publ., 1984, pp. 104–111.

3. *Мочалов Б.А.* Рекомендации и технологические карты по выращиванию саженцев сосны и ели в питомниках северной и средней подзон тайги европейской части России. Архангельск: СевНИИЛХ, 2005. 35 с.

Mochalov B.A. *Recommendations and Technological Charts for Growing Seedlings of Pine and Spruce in Nurseries of Northern and Middle Taiga Subzones of the European Part of Russia*. Arkhangelsk, NRIF Publ., 2005. 35 p.

4. *Нуреева Т.В., Мифтахов Т.Ф., Чурикова М.Н., Белоусов А.А., Краснов В.Г.* Состояние и продуктивность искусственных сосняков, созданных на сельскохозяйственных землях, в заповеднике «Большая Кокшага» // *Научные труды Государственного природного заповедника «Большая Кокшага»*. Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т, 2013. Вып. 6. С. 185–198.

Nureyeva T.V., Miftakhov T.F., Churikova M.N., Belousov A.A., Krasnov V.G. The State and Productivity of Homogeneous Pine Forests Located on the Agricultural Lands in the Bolshaya Kokshaga Reserve. *Proceedings of the Bolshaya Kokshaga Nature Reserve*. Yoshkar-Ola, MarSU Publ., 2013, vol. 6, pp. 185–198.

5. *Пигарев Ф.Т., Беляев В.В., Сунгуров Р.В.* Комплексная оценка качества посадочного материала и его применение на Европейском Севере. Архангельск: АИЛиЛХ, 1987. 14 с.

Pigarev F.T., Belyayev V.V., Sungurov R.V. *Integrated Assessment of the Quality of Planting Material and Its Application in the European North*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1987. 14 p.

6. *Пигарев Ф.Т., Сунгуров Р.В., Гаевский Н.П., Козловский В.Д.* Рост, изменчивость и строение культур сосны, созданных разными сеянцами // *Вопросы экономики лесного хозяйства и лесоустройства на Европейском Севере*. Архангельск, 1987. С. 104–110.

Pigarev F.T., Sungurov R.V., Gaevskiy N.P., Kozlovskiy V.D. Growth, Variability and Structure of Pine Crops Created by Different Seedlings. *Issues of Forest Economics and Forest Management in the European North*. Arkhangelsk, 1987, pp. 104–110.

7. *Рогозин М.В.* Селекция сосны обыкновенной для плантационного выращивания: моногр. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2013. 200 с.

Rogozin M.V. *Selection of Scots Pine for Plantation Cultivation*: Monograph. Perm, PSU Publ., 2013. 200 p.

8. Рогозин М.В., Разин Г.С. Лесные культуры Теплоуховых в имении Строгановых на Урале: история, законы развития, селекция ели / под ред. М.В. Рогозина. Пермь, 2011. 192 с.

Rogozin M.V., Razin G.S. *Teploukhovs' Forest Plantations in the Stroganov Estate in the Urals: History, Laws Development, Selection of Spruce*. Ed. M.V. Rogozin. Perm, 2011. 192 p.

9. Рогозин М.В., Разин Г.С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы: моногр. / под ред. М.В. Рогозина; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. 11 Мб. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Rogozin M.V., Razin G.S. *Development of Tree Stands. Models, Laws, Hypotheses: Monograph*. Ed. by M.V. Rogozin. Perm, PSU Publ., 2015.

10. Ромедер Э., Шенбах Г. Генетика и селекция лесных пород. М.: Сельхозиздат, 1962. 268 с.

Rohmeder E., Schönbach H. *Genetik und Züchtung der Waldbäume* [Genetics and Breeding of Forest Species]. Trans. from German. Moscow, Selkhozizdat Publ., 1962. 268 p.

11. Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В. Анализ состояния и роста культур сосны и ели в северо-таежном районе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 2. С. 70–79.

Sungurova N.R., Sungurov R.V. The Analysis of the Condition and Growth of Pine and Spruce Crops in the North-Taiga District. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 2, pp. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.2.70>

12. Baumanis I., Lipins L. Forest Science in Latvia. *Baltic Forestry*, 1995, vol. 1, no. 1, pp. 22–29.

13. Gabrilavičius R. Genotypic Structure of Scots Pine Populations. *Biology*, 1994, no. 2, pp. 29–30.

14. Gabrilavičius R., Danusevičius I. Genetic Resources of Conifers and Their Conservation in Lithuania. *Baltic Forestry*, 1996, vol. 2, no. 1, pp. 15–21.

15. Хаапанен М. *Evaluation of Options for Use in Efficient Genetic Field Testing of Pinus sylvestris* (L.). Research Papers 826. Finnish Forest Research Institute, 2002. 144 p.

16. Jansson G., Danell Ö., Stener L.-G. Correspondence between Single-Tree and Multiple-Tree Plot Genetic Tests for Production Traits in *Pinus sylvestris*. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, vol. 28, no. 3, pp. 450–458. DOI: <https://doi.org/10.1139/x98-004>

17. Kuuluvainen T., Wallenius T.H., Kauhanen H., Aakala T., Mikkola K., Demidova N., Ogibin B. Episodic, Patchy Disturbances Characterize an Old-Growth *Picea abies* Dominated Forest Landscape in Northeastern Europe. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 320, pp. 96–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.024>

18. Lambeth C.C., Buijtenen J.P., Duke S.D., McCullough R.B. Early Selection is Effective in 20-Year-Old Genetic Tests of Loblolly Pine. *Silvae genetica*, 1983, vol. 32(5-6), pp. 210–215.

19. Lindgren D. Prediction and Optimization of Genetic Gain with Regard to Genotype x Environment Interaction. *Studia forestalia snecica*, 1982, vol. 166, pp. 15–24.

20. Mikola J. Progeny Testing in Conifers. *Progeny Testing and Breeding Strategies: Proceedings of the Nordic Group of Tree Breeders, Edinburgh, October 6–10, 1993*. Edited by S.J. Lee. Edinburgh, Forestry Commission, 1993, pp. 1–17.

21. Omelko A., Ukhvatkina O., Zhmerenetsky A., Sibirina L., Petrenko T., Bobrovsky M. From Young to Adult Trees: How Spatial Patterns of Plants with Different Life Strategies Change during Age Development in an Old-Growth Korean Pine-Broadleaved Forest. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 411, pp. 46–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.023>

22. Rogozin M.V., Razin G.S. Development of the Forest Stand and Its Constant. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya Biologiya* [Bulletin of Perm University. Biology], 2012, no. 2, pp. 13–21.

23. Rogozin M.V., Razin G.S. *Development of Forest Stands. Models, Laws, Hypotheses*. Raleigh, NC, Lulu Press, 2015. 201 p.

24. Szymanski S. Wpływ jakości sadzonek sosnowych na wzrost i roznicowanie się drzewostanu. *Pr. Komis. nauk rob. i kom. nauk les. PTPN*, 1979, no. 48, pp. 23–41.

BIOMETRIC PARAMETERS OF PLANTING MATERIAL AS A TEST INDICATOR OF SUCCESS OF *Pinus silvestris* L. PLANTATIONS

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

Anna A. Drochkova, Postgraduate Student; ReseracherID: [H-1869-2019](https://orcid.org/0000-0003-3503-5767),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3503-5767>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: nsungurova@yandex.ru, annadrochkova@gmail.com

Abstract. The creation and cultivation of artificial plantations of conifers largely depends on the planting material quality. The paper is devoted to the study of the relationship between the main parameters of planting material of Scots pine (*Pinus silvestris* L.) with inventory indices of artificial plantations. Forest trials of Scots pine in the Arkhangelsk region, created in a haircap-moss forest site type, were investigated. Seedlings of Scots pine with standard size were divided into large, medium, small according to the diameter of the root cervix in order to set the experiment, which aimed to determine the relationship between the parameters of planting material and characteristics of the forming plantations. The research purpose determined the main task, mainly, to find out from which plants the “trees of the future” (fast-growing large specimens) are laid out. Plants grown from the large seedlings are characterized by the greatest height. This position, in relation to individuals formed from medium and small planting material, is maintained and gradually increases. From the initial phases of development, a kind of mobile equilibrium is established in the studied plantation. All the trees are growing at a very fast rate, but the initial (at the time of planting on the silvicultural area) size of the planting material corresponding to the pine plants that survived in different years on the plantations continues to remain constant. It was found that, the largest number of leaders (47 % of all survived seedlings) grew of the large seedlings by the end of the 2nd age class. Therefore, high-quality soil treatment together with the use of high-quality proportionally developed planting material significantly increases the inventory indices of plants in the stand, and allows getting the target assortments 15–20 years earlier.

For citation: Sungurova N.R., Drochkova A.A. Biometric Parameters of Planting Material as a Test Indicator of Success of *Pinus silvestris* L. Plantations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 107–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-107-116

Keywords: artificial plantings, pine, forest crops, seedlings, productivity of stands, quality of planting material.



УДК 630.372:629.733.34

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-117-130

ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РУБОК НА ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

А.В. Абузов, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAK-3854-2021](https://orcid.org/0000-0003-1082-9392),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

П.Б. Рябухин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAK-3906-2021](https://orcid.org/0000-0003-1735-1942),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136,
г. Хабаровск, Россия, 680042; e-mail: ac-systems@mail.ru, 000340@pnu.edu.ru

Аннотация. В рамках реализации принципов устойчивого лесопользования как на лесопромышленных предприятиях, так и в организации лесного хозяйства актуальным становится вопрос разработки технологий и оборудования, отвечающих современным требованиям сохранения лесной среды и щадящего режима лесозаготовки. К подобным технологиям относятся разработанные и апробированные на практике опытные методы заготовки древесины с использованием аэростатно-канатных систем при проведении различных видов рубок. Особый интерес представляет концепция применения указанного оборудования исходя из назначения рубок и предъявляемых при их реализации экологических и лесохозяйственных требований. Статья носит познавательный-информационный характер, ее цель – дать специалистам сведения о новых технологиях и конструкциях специализированного оборудования для обеспечения щадящих режимов лесопользования и лесозаготовки. Представлены результаты теоретических исследований по возможным направлениям применения аэростатно-канатных систем при проведении работ на лесных участках, расположенных на землях особо охраняемых природных территориях. Предложены конструкции специализированного оборудования для вертикального изъятия деревьев (хлыстов) в процессе промежуточных рубок на участках с признаками труднодоступности и экологической зависимости. Такие механизмы позволят значительно снизить энергозатраты при удалении ветвей и сучьев со стоящего дерева и его вертикальном изъятии из насаждения. Конструкции в виде захватного, захватно-срезающего и сучкорезно-срезающего устройства с захватом за счет того, что спил и транспортировка дерева осуществляются без его предварительного падения, обеспечивают максимально возможное сохранение лесной среды, поскольку не наносят ущерба ни стоящему рядом древостою, ни подросту, ни почве.

Для цитирования: Абузов А.В., Рябухин П.Б. Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 117–130. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-117-130

Ключевые слова: промежуточные рубки, территории с признаками экологической зависимости, аэростатно-канатная система, грузозахватный механизм, захватно-срезающее устройство, натяжение каната, контур лесного участка.

Введение

Для повышения биологической устойчивости леса, предотвращения в нем болезней, патологических процессов и, соответственно, снижения ущерба от воздействия вредителей на территориях с признаками труднодоступности и экологической зависимости проводятся комплексные санитарно-оздоровительные мероприятия. Для реализации данных целей и поддержания полезных свойств древостоев на таких территориях лесным законодательством предусмотрено проведение санитарных рубок и рубок ухода с удалением из насаждений нежелательных деревьев и созданием благоприятных условий для роста лучших экземпляров главных пород. Все эти мероприятия направлены на формирование высокопродуктивных качественных насаждений и могут способствовать получению на данных территориях отведенных объемов древесины определенных пород для нужд промышленных предприятий. Полный запрет на вырубку деревьев не только не даст положительного лесохозяйственного эффекта, но и нанесет значительный урон насаждениям. При этом мероприятия по сохранению оставляемых деревьев и подроста считаются одной из главных мер, содействующих естественному возобновлению и ускоренному воспроизводству лесов, а также сокращению (по сравнению с лесными культурами) в 2–3 раза количества уходов за молодыми древостоями [11].

Основным негативным моментом при проведении рубок промежуточного пользования является нанесение ущерба остающимся деревьям из-за применения тяжелой лесозаготовительной техники, не подходящей для выполнения таких видов работ. Использование этих машин приводит к многочисленным повреждениям стволов и крон неубираемых экземпляров, уничтожению подроста, нарушению почвенного покрова и корней, в результате усиливается усыхание древостоев, развиваются болезни и растет число вредителей. Эти факты были доказаны, например, при проведении санитарных рубок вокруг озера Амут, расположенного в Солнечном районе Хабаровского края. Насаждения вокруг данного водоема относятся к категории горных защитных лесов с целевым назначением в выполнении разнообразных средообразующих функций, включающих в себя водоохранные и противоэрозионные. Даже если возникает острая необходимость проведения в таких лесах санитарных рубок, то их нужно осуществлять в как можно более щадящем режиме и на небольших участках.

Правительственная комиссия Хабаровского края, в состав которой входили эксперты Дальневосточного научно-исследовательского института лесного хозяйства, Рослесозащиты, Департамента лесного хозяйства по Дальневосточному федеральному округу, сотрудники природоохранной прокуратуры, несколько дней работала над проверкой обоснованности массовых вырубок. Установлено, что природной среде нанесен серьезный ущерб. Было обнаружено: огромное количество порубочных остатков, сломанных стволов оставляемых деревьев и подроста, а также загрязнения водотоков и минерализация почвы на территории более 25 % отведенного в санитарную рубку участка (рис. 1).



Рис. 1. Последствия проведения санитарных рубок с использованием лесозаготовительной техники

Fig. 1. Consequences of sanitary felling using logging equipment

Причиной сложившейся ситуации послужило решение руководителей лесничества осуществить столь крупномасштабные санитарные рубки на территориях с признаками труднодоступности и экологической зависимости с использованием систем лесозаготовительных машин (харвестер+форвардер), предназначенных для проведения промышленных рубок [8, 10]. Анализ примеров такой деятельности в различных регионах Российской Федерации показывает, что для предотвращения нанесения масштабного экологического ущерба лесной среде промежуточными рубками необходимо полностью запретить применение при проведении данных рубок тяжелой лесозаготовительной техники, а также наземного способа трелевки деревьев (хлыстов).

Объекты и методы исследования

Единственной альтернативой лесозаготовительной технике на гусеничном или колесном движителе при проведении промежуточных рубок на экологически зависимых территориях с точки зрения лесохозяйственных требований являются технологии с использованием воздушного или подвешного канатного транспорта, в частности аэростатно-канатные системы (АКС) для трелевки древесины [4, 5, 7, 12, 17, 21–23]. На данный момент существуют и разрабатываются АКС (с учетом обеспечения их грузозахватным механизмом) со следующими режимами работы:

подъем и транспортировка спиленных и поваленных деревьев;

подъем и транспортировка вертикально стоящих деревьев с предварительным спилом без их падения на землю.

Транспортировка предварительно спиленных и поваленных деревьев считается самым распространенным методом воздушных лесозаготовительных операций. Он состоит из нескольких этапов: захват ствола дерева; подъем и перемещение в подвешном режиме, при этом груз находится выше верхнего яруса деревьев на 10–15 м и более. Для реализации данного способа используются специальные грейферные захваты и автоматические крюки, предназначенные для удержания, подъема и транспортировки как отдельных стволов (деревьев, хлыстов, сортиментов), так и сформированных из них пачек. Допускается также транспортировка отдельных стволов, соединенных в «гирлянду» (рис. 2).

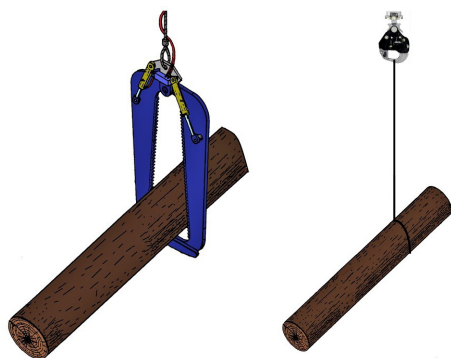


Рис. 2. Грузозахватные механизмы для транспортировки спиленных и поваленных деревьев

Fig. 2. Load-grabbing mechanisms for transportation of cut and felled trees

Как показывают исследования, проведенные авторами на лесопромышленных предприятиях Хабаровского края, значительные повреждения наносятся растущим древостоям в процессе непосредственного падения дерева при выполнении операции валки [1–3].

Экспериментальные наблюдения выявили следующие закономерности повреждений (рис. 3–4):

при увеличении запаса леса на 10–15 м³/га повреждаемость оставшихся на корню деревьев повышается в среднем на 3,5 %;

при увеличении уклона на 5° повреждаемость оставшихся на корню деревьев растет в среднем на 12–13,5 %;

основным видом повреждений у подростка и тонкомера являются слом и ошмыг, у взрослых деревьев – преимущественно ошмыг;

вероятность одновременного повреждения нескольких деревьев (2–4 шт.) на одно спиленное и поваленное дерево составляет в среднем 20–28 %.

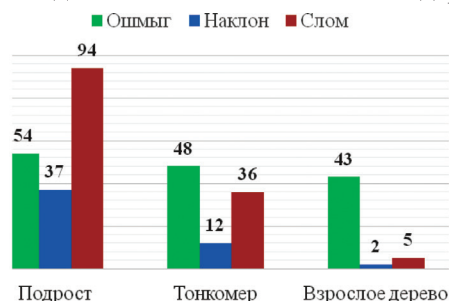


Рис. 3. Распределение количества поврежденных деревьев по типам древостоя (на 100 фиксации), шт.

Fig. 3. Distribution of the number of damaged trees by stand types (per 100 fixations), pcs

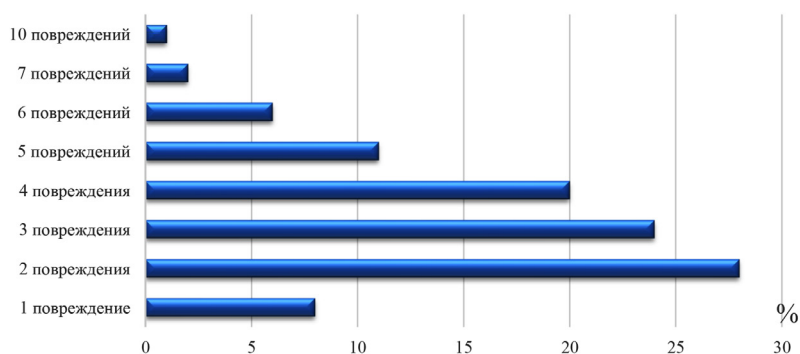


Рис. 4. Количество одновременных повреждений стоящего древостоя при падении одного спиленного дерева (на 100 фиксации), %

Fig. 4. The number of simultaneous damages of standing trees when one sawn tree falls (per 100 fixations), %

Для реализации методов лесозаготовки, позволяющих свести к минимуму экологический и лесоводственный ущерб, в мировой практике разработаны и применяются (на уровне апробации) технологии с использованием режима изъятия вертикально стоящих деревьев. Однако у подобных методов есть один значительный недостаток – высокие энергетические затраты [18].

Процесс изъятия вертикально стоящих деревьев имеет следующие варианты (рис. 5):

обрезка кроны дерева вальщиком-верхолазом с последующим подпиллом комлевой части и допил дерева при захвате ствола одиночным грейферным механизмом;

обрезка кроны дерева вальщиком-верхолазом и захват ствола двойным автоматизированным захватно-срезающим механизмом, затем – спил;

захват дерева, очистка кроны с дальнейшим спиливанием при использовании автоматизированного захватно-срезающего устройства.

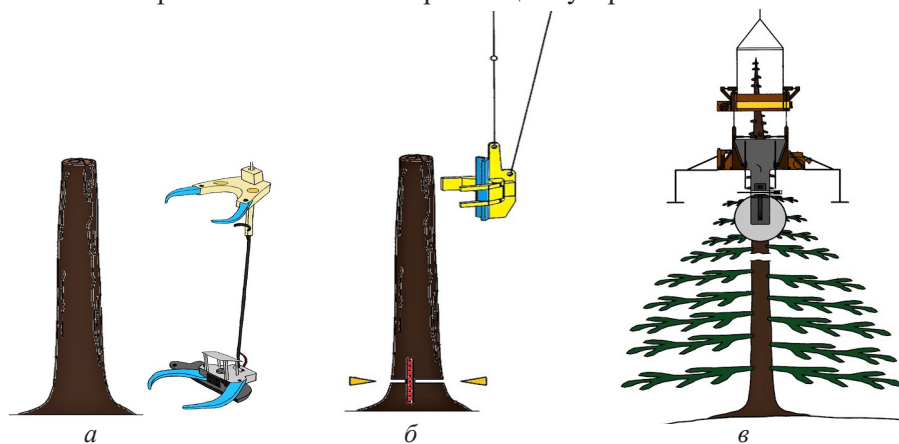


Рис. 5. Механизмы для изъятия вертикально стоящих деревьев: *a* – захватно-срезающее устройство; *б* – захватное устройство; *в* – сучкорезно-срезающее устройство с захватом
Fig. 5. Mechanisms for the removal of upright trees: *a* – gripping-cutting device; *б* – grabbing device; *в* – knot-cutting device with a grabber

Для эффективной работы АКС в режиме изъятия вертикально стоящих деревьев авторами разработан ряд новых грузозахватных механизмов (ГЗМ). Их преимущество заключается в значительном снижении энергетических затрат, повышенной производительности и, соответственно, более низкой себестоимости выполняемых работ [13, 14, 16, 24]. Расчет энергетических параметров процесса срезания сучьев со стоящего дерева произведен с учетом принципов устойчивости систем в условиях колебания грузовой подвески [6, 9, 15]. По результатам исследований предложены следующие варианты конструкций, особенностями которых является принцип инерционного типа движения по нисходящему и восходящему направлению относительно ствола дерева и очистка кроны с использованием внутренних ножей ГЗМ:

- разделяющийся ГЗМ нисходящего типа движения;
- разделяющийся ГЗМ восходящего типа движения;
- ГЗМ восходящего типа движения с дополнительным манипулятором;
- одиночный ГЗМ восходящего типа движения (ОГЗМ ВТД).

Инерционность спуска или подъема ГЗМ и, соответственно, очистка кроны дерева обеспечиваются электрическим приводом бортовых мини-лебедок, находящихся под оболочкой аэростата, или непосредственным использованием подъемной силы самого аэростата. Такой способ обрезки кроны дерева позволяет снизить затраты энергии по сравнению с технологиями, где для среза ветвей и сучьев применяются дисковые пилы с электрическим или гидравлическим приводом.

Разработанные варианты ГЗМ используются в воздушной лесозаготовительной системе, которая представляет собой технологический комплекс, состоящий из следующих элементов:

аэростат луковичного типа, управляемый наземным лебедочным комплексом с помощью системы тягово-возвратных канатов;

бортовая аэростатная лебедка;

ГЗМ;

система наведения и стабилизации ГЗМ.

Общий вид технологического комплекса, в который входит АКС, представлен на рис. 6 [1].

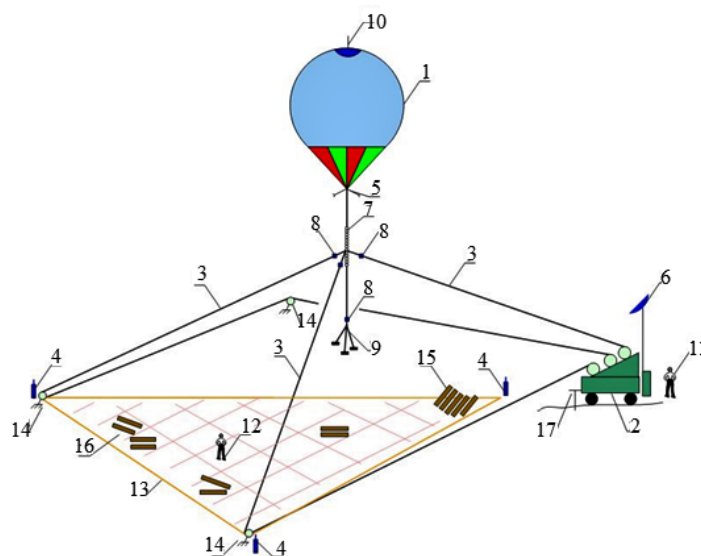


Рис. 6. Общий вид комплекса с АКС: 1 – аэростат; 2 – наземный лебедочный комплекс; 3 – тягово-возвратные канаты; 4 – контурный радиомаяк; 5 – радар системы управления; 6 – комплекс управления навигационной системой; 7 – амортизатор; 8 – электронные динамометры; 9 – грузозахватный механизм; 10 – молниеотвод; 11 – оператор лебедочного комплекса; 12 – дополнительный оператор; 13 – контур рабочего участка; 14 – направляющие контурные шкивы; 15 – пункт разгрузки; 16 – сортименты; 17 – заземление

Fig. 6. General view of a complex with a balloon-rope system (BRS): 1 – balloon; 2 – ground winch complex; 3 – traction and return ropes; 4 – contour radio beacon; 5 – control system radar; 6 – navigation system control complex; 7 – shock absorber; 8 – electronic dynamometers; 9 – load-grabbing mechanism; 10 – lightning rod; 11 – operator of the winch complex; 12 – additional operator; 13 – working area contour; 14 – guide contour pulleys; 15 – unloading point; 16 – assortments; 17 – grounding

Результаты исследования и их обсуждение

Технологический процесс заготовки древесины с использованием ГЗМ (грейферных, разделяющихся и фронтальных) включает в себя несколько этапов.

Первый этап – подготовительный, в процессе которого определяются координаты внешнего и внутреннего контуров эксплуатационного участка. Размеры внутреннего контура зависят от площади части особо охраняемой природной территории, отведенной под промежуточные рубки. Размеры внешнего контура рассчитываются исходя из показателей нагрузок, которые могут возникнуть в канатах АКС. Также принимаются во внимание отклонения грузовой подвески с ГЗМ от границы внутреннего контура. Локальные координаты внешнего контура находятся с помощью фиксации сигналов, исходящих от радиомаячков, расположенных по углам участка. Запеленгованные сигналы поступают в систему сбора и обработки радиосигналов с дальнейшим расчетом координат. Обработав сигнал, система выдает на дисплее пульта управления координаты расположения направляющих контурных шкивов, тем самым задавая координаты участка в системе координат X, Y, Z , где точка расположения лебедочного комплекса считается нулевой.

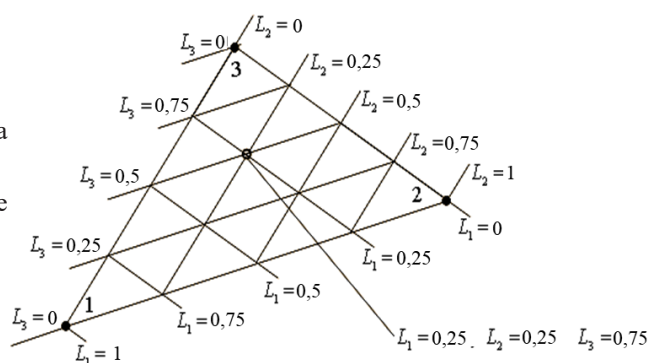
Далее во внутреннем контуре участка проводится фиксация отведенных под рубку деревьев с помощью радиопередатчика, связанного с системой локальной пеленгации АКС. Измерительно-вычислительный комплекс устанавливает локальные координаты каждого такого дерева, совмещая их с координатами внешнего контура участка, что в дальнейшем определяет последовательность его разработки с применением наземного лебедочного комплекса.

Полученные координаты позволяют задать не только последовательность разработки участка, но и режимы АКС, обуславливающие длину, скорости сдвигания и выбирания для каждого из трех тягово-возвратных канатов при автоматической наводке ГЗМ в точку нахождения дерева путем перемещения аэростата с помощью наземного лебедочного комплекса [19, 20, 25, 26].

Разработанное программное обеспечение для расчета и определения положений точки грузовой подвески с ГЗМ основывается на методе аппроксимации рельефа по L -координатам (рис. 7).

Рис. 7. Относительная система L -координат

Fig. 7. Relative L -coordinate system



Для примера рассмотрим конструкцию и технологию применения одиночного ГЗМ восходящего типа движения, предназначенного для вертикального изъятия дерева с его последующей транспортировкой.

Данный тип ГЗМ необходим для выполнения лесозаготовительных работ с использованием на валке деревьев вальщика с бензомоторным инструментом. Управление наведением ГЗМ, захватом и срезанием ветвей осуществляется вальщиком при помощи дистанционного пульта с последующей передачей управления основному оператору наземного лебедочного комплекса. Общий вид конструкции ОГЗМ ВТД представлен на рис. 8.

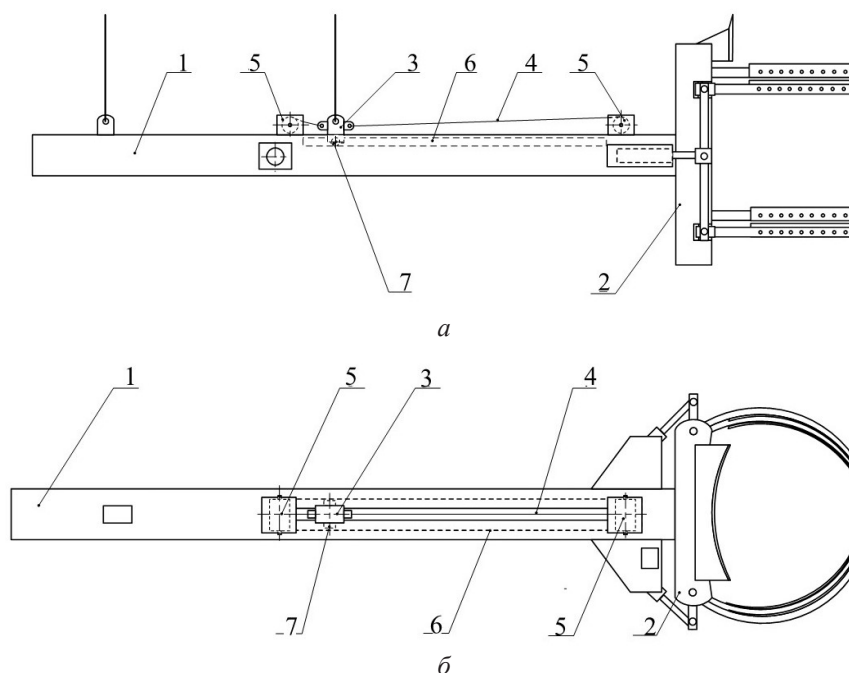


Рис. 8. Конструкция ОГЗМ ВТД: *а* – вид сбоку; *б* – вид сверху

Fig. 8. The design of a single load-grabbing mechanism of ascending mode of motion: *a* – side view; *b* – top view

В составе ОГЗМ ВТД отсутствует пильный механизм. Его заменяет одиночная балочная конструкция *1* с захватно-срезающим устройством *2*. Расчет конструкции срезающего механизма произведен в соответствии с рекомендациями [15].

Управление спуском и подъемом ГЗМ осуществляется с помощью бортовой аэростатной лебедки и двух электрических грузовых канатов, один из которых в месте соединения с балочной конструкцией имеет подвижный кронштейн крепления *3*. Он связан тяговым канатом *4* с маневровыми мини-лебедками *5*, обеспечивающими поступательно-возвратное движение кронштейна вдоль балочной конструкции. Перемещение кронштейна *3* осуществляется по внутренним канавкам *б* посредством расположенных в нем осевых втулок скольжения *7*. За счет этого движения происходит управление наведением с проникновением захватного устройства под крону дерева с последующей очисткой его ствола и распределение центра тяжести и устойчивости всего ГЗМ.

При перемещении ГЗМ к месту загрузки он должен находиться непосредственно под оболочкой аэростата, что обеспечивает избежание колебаний грузовой подвески. Достигнув заданной точки нахождения дерева, аэростат

стат останавливается за счет затормаживания работы барабанов наземного лебедочного комплекса. Далее выполняется опускание и наведение ГЗМ на комлевую часть дерева с помощью бортового лебедочного комплекса, также находящегося под оболочкой аэростата. После расположения ГЗМ перпендикулярно дереву вальщик, используя дистанционный пульт управления аэростатом, с помощью тягово-возвратных канатов наземного лебедочного комплекса горизонтально двигает ствол и фиксирует его в захватно-срезающем устройстве. Затем захватно-срезающее устройство бортовой лебедкой поднимается вверх вдоль ствола, одновременно очищая его от ветвей. По достижении вершинной части оно останавливается и спускается обратно до точки равной в среднем $\frac{2}{3}$ высоты дерева. Далее происходит захват и удержание ствола, в этот момент вальщик производит спил комлевой части дерева. Подъем и транспортировка спиленного ствола осуществляются посредством подъема аэростата на необходимую высоту и его перемещения на разгрузочный пункт сдаванием и выбором тягово-возвратных канатов лебедкой, управление которой может быть проведено в дистанционном радиорежиме непосредственно вальщиком или оператором лебедки.

Технологический процесс заготовки деревьев с использованием АКС, оснащенной ОГЗМ ВТД, представлен на рис. 9.

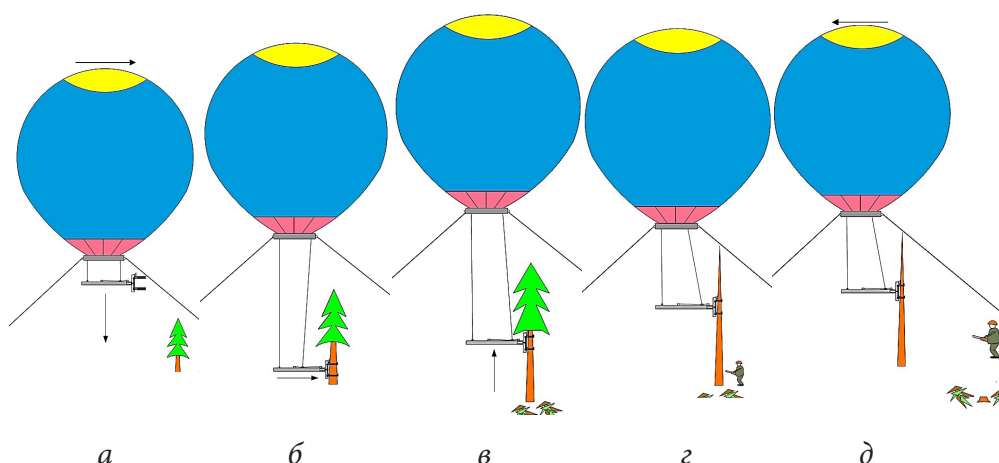


Рис. 9. Процесс заготовки деревьев с использованием АКС, оснащенной ОГЗМ ВТД: *а* – движение в точку загрузки; *б* – наведение; *в* – обрезка ветвей; *г* – удержание и спил; *д* – транспортировка дерева в точку разгрузки

Fig. 9. The process of harvesting trees using a balloon-rope system equipped with a single load-grabbing mechanism of ascending mode of motion: *a* – motion to the loading point; *b* – guidance; *v* – pruning; *г* – holding and cutting; *д* – wood transportation to the unloading point

Заготовка древесины с использованием АКС проходит по пасечному или секторальному принципу, что учитывается при определении размера рабочих площадок, располагающихся во внутреннем контуре обрабатываемого участка [4]. Для первого из названных принципов при выборочных рубках ширина пасеки может задаваться средней высотой произрастающих на разрабатываемой площади деревьев. При этом площадки располагаются как поперек, так и вдоль склона.

В случае применения пасечного метода поперек склона работа начинается с его нижней точки с постепенным смещением вверх до границы внутреннего контура. Для этой цели вдоль нижней стороны участка прокладывается временный волок шириной до 5 м, обеспечивающий свободный доступ ГЗМ к комлевой части деревьев, расположенных внизу склона. Последовательность разработки площадки зависит от погодных условий и рельефа местности. При допустимой скорости ветра и оптимальном температурном режиме целесообразно начинать рубку с крайних левой и правой пасек с последующим смещением ближе к центру участка. Это связано с тем, что при скорости ветра более 12 м/с увеличивается вероятность потери АКС устойчивости в момент работы вдоль границы внутреннего контура. Если ветер данной скорости присутствует с первого дня цикла работ, то их следует начинать, наоборот, с центральной пасеки с постепенным смещением вправо или влево к границам внутреннего контура.

Технология разработки лесного участка АКС по пасечному принципу поперек склона на примере ОГЗМ, работающего в паре с вальщиком, представлена на рис. 10.

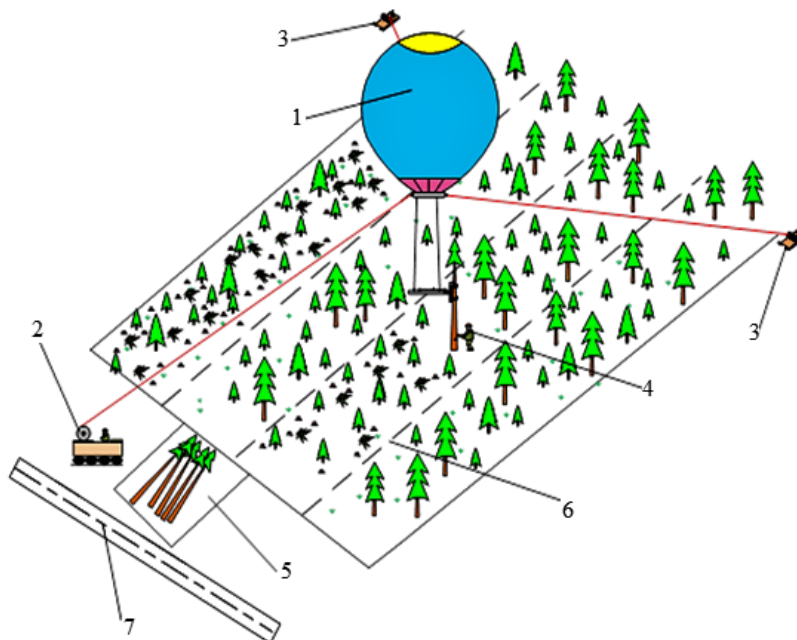


Рис. 10. Технологическая схема разработки лесного участка поперек склона с использованием ОГЗМ ВТД: 1 – аэростат; 2 – основная лебедка; 3 – мини-лебедка; 4 – вальщик; 5 – разгрузочный пункт; 6 – граница пасеки; 7 – технологический волок

Fig. 10. Technological scheme for the development of a forest area across the slope using a single load-grabbing mechanism of ascending mode of motion: 1 – balloon; 2 – main winch; 3 – mini-winch; 4 – feller; 5 – unloading point; 6 – swath border; 7 – technological run

При секторальном принципе разработки эксплуатационные участки по форме представляют собой квадраты и располагаются в шахматном порядке, размер каждого сектора определяется в зависимости от характеристик древо-стоя и может достигать в среднем по 25–30 м для обеих сторон.

Заключение

Использование тяжелой лесозаготовительной техники при проведении рубок промежуточного пользования на особо охраняемых природных территориях становится причиной многочисленных повреждений стволов и кроны оставляемых деревьев, уничтожения подроста, нарушения почвенного покрова и корней. В результате усиливается усыхание древостоев, развиваются болезни и растет число вредителей.

Анализ примеров подобной деятельности в различных регионах Российской Федерации показывает, что для предотвращения таких ситуаций необходимо установить полный запрет на применение при промежуточных рубках традиционной лесозаготовительной техники и наземного способа трелевки деревьев (хлыстов).

Единственной альтернативой используемым лесозаготовительным машинам (на гусеничном или колесном движителе) и технологиям при промежуточных рубках на территориях с признаками труднодоступности и экологической зависимости с точки зрения лесохозяйственных требований являются аэростатно-канатные системы для трелевки древесины, снабженные грузозахватными устройствами с различными конструкциями инерционного режущего механизма для удаления ветвей с вертикально стоящего дерева.

В зависимости от применяемого способа заготовки с использованием аэростатно-канатных систем предлагаются технологии работы по пасечному и секторальному принципам, выбор которых зависит от рельефа местности и конфигурации отведенных в рубку лесных участков. Пасеки имеют прямоугольную форму, их расположение может быть как поперек, так и вдоль склона. При секторальном принципе участки представляют собой квадраты, располагающиеся в шахматном порядке. Размер территории и в том и в другом случае рекомендуется устанавливать в зависимости от средней высоты произрастающих на разрабатываемой площади древостоев.

Предложенные технологии промежуточных рубок на территориях с признаками труднодоступности и экологической зависимости при помощи аэростатно-канатных систем, обеспеченных специальным оборудованием для обработки (захват, обрезка сучьев, изъятие) вертикально стоящего в насаждении дерева, позволят производить заготовку отведенной в рубку древесины для дальнейшего ее возможного использования с максимальным сохранением лесной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абузов А.В.* Анализ повреждаемости растущих древостоев от процесса валки дерева на горном склоне // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса: в 2 т. Т. 2. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2019. С. 555–557. (Научные чтения памяти профессора М.П. Даниловского. Вып. 18).

Abuzov A.V. Analysis of Damage to Growing Forest Stands from the Process Rolls Tree on the Hillside. *The Far East: Problems of Development of the Architecture and Construction and the Road-Transport Complex*. In 2 vol. Vol. 2. Khabarovsk, PNU Publ., 2019, pp. 555–557.

2. Абузов А.В., Бертонас Р.В. Особенности лесозаготовительного процесса при вертикальном изъятии и транспортировке деревьев воздушным способом // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур / под ред. проф. П.Б. Рябухина. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2015. С. 67–70.

Abuzov A.V., Bertonas R.V. Features of the Logging Process during Vertical Removal and Transportation of Trees by Air. *Philosophy of Modern Nature Management in the Amur River Basin*. Ed. by P.B. Ryabukhin. Khabarovsk, PNU Publ., 2015, pp. 67–70.

3. Абузов А.В., Казаков Н.В. Экологические последствия в лесных насаждениях, подверженных техногенному воздействию при лесозаготовительных и транспортных операциях // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28, № 1. С. 7–18.

Abuzov A.V., Kazakov N.V. Ecological Consequences in Forest Stands Subject to Anthropogenic Impact during Logging and Transport Operations. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [RUDN Journal of Ecology and Life Safety], 2020, vol. 28, no. 1, pp. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-1-7-18>

4. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока: моногр. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2013. 199 с.

Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Balloon Transport for Mountain Logging in the Far East*: Monograph. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 199 p.

5. Буткин В.Д. Аэростатно-канатные транспортные системы для открытых горных работ // Горн. журн. 1998. № 6. С. 56–57.

Butkin V.D. Balloon Cable Transport Systems for Surface Mining. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 1998, no. 6, pp. 56–57.

6. Венценовцев Ю.Н. Методика поиска наилучших технических и технологических решений // Материалы Всесоюз. симп. по проблемам автоматизации проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов / отв. ред. Г.А. Борисов. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1979. С. 32–38.

Ventsenostsev Yu.N. The Methodology for Searching the Best Technical and Process Solutions. *Proceedings of the All-Union Symposium on Problems of Design Automation of Transport and Land Reclamation of Woodlands*. Ed. by G.A. Borisov. Petrozavodsk, KF AN SSSR Publ., 1979, pp. 32–38.

7. Волков Е.С., Плютюв Ю.А. Результаты испытаний гравитационной аэростатно-канатной транспортной установки // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Екатеринбург: УГГУ, 2010. С. 20–22.

Volkov E.S., Plyutov Yu.A. Test Results of Gravitational Balloon Cable Transport Installation. *Technological Equipment for the Mining and Oil and Gas Industry: The 8th International Science and Technology Conference "Readings in Memory of V.R. Kubachek"*. Yekaterinburg, USTU Publ., 2010, pp. 20–22.

8. Герц Э.Ф. Вероятность повреждения деревьев в процессе трелевки при несплошных рубках // Лесн. пром-сть. 2004. № 2. С. 13–14.

Gerts E.F. Probability of Damage to Trees in the Process of Skidding during Partial Logging. *Lesnaya promyshlennost'*, 2004, no. 2, pp. 13–14.

9. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: систем. подход / пер. с польск. М.: Мир, 1981. 454 с.

Ditrih Ya. *Design and Construction: System Approach*. Trans. from Polish. Moscow, Mir Publ., 1981. 454 p.

10. Исаев В.И. Влияние техники и технологии лесосечных работ на изменение водно-физических свойств почвы // Пути и методы лесорастительной оценки почв и повышение их продуктивности. Пушкино: ВНИИЛМ, 1980. С. 80–81.

Isayev V.I. Influence of Logging Machinery and Technology on Changes in Water-Physical Properties of Soil. *Ways and Methods of Forest Growth Assessment of Soils and Improvement of Their Productivity*. Pushkino, VNIILM Publ., 1980, pp. 80–81.

11. Ковалев А.П. Роль способов рубок в рациональном использовании природных ресурсов Дальнего Востока // Рациональные основы организации и ведения лесного хозяйства. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2001. С. 197–219.

Kovalev A.P. The Role of Logging Methods in the Rational Use of Natural Resources of the Far East. *Rational Basis of Forestry Management and Organization*. Khabarovsk, Dal'NILKh Publ., 2001, pp. 197–219.

12. Козловский В.Б., Худоленко О.В., Деревянко В.С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. М.: Воздуш. транспорт, 2007. 480 с.

Kozlovsky V.B., Khudolenko O.V., Derevyanko V.S. *Balloon Aircrafts for Economic Sectors*. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 2007. 480 p.

13. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях». Ч. 1 и 2. Химки: ЦНИИМЭ, 1985. 189 с.

Research Report "Study of the Possibilities of Using Aircrafts for Logging in Mountains". Parts 1, 2. Khimki, TsNIIME Publ., 1985. 189 p.

14. Отчет об испытаниях аэростата-крана ЭПАК-1. М.: МПНСУ треста Центротехмонтаж, 1977. 50 с.

Test Report of the Aerostat Crane EPAC-1. Moscow, MPNSU Tsentrotekhmontazh Publ., 1977. 50 p.

15. Печенкин В.Е., Мазуркин П.М. Бесстружечное резание древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 144 с.

Pechenkin V.E., Mazurkin P.M. *Chipfree Wood Cutting*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 144 p.

16. Родионов В.И., Скобей В.В. Статический расчет тягово-удерживающих канатов аэростатно-трелевочной установки (АТУП) // Тр. ЦНИИМЭ. М., 1966. № 75. с. 113–126.

Rodionov V.I., Skobey V.V. Static Analysis of Tether Line Cables of a Balloon Logging System. *Academic Papers of the Central Research and Design Institute of Mechanization and Energy of the Forest Industry*. Moscow, 1966, no. 75, pp. 113–126.

17. Рябухин П.Б., Абузов А.В. Аэростатические аппараты и их применение в лесной промышленности // Вопросы совершенствования технологий и оборудования в лесопромышленном комплексе и строительстве: Юбил. сб. науч. тр. Дальневосточ. лесотехн. ин-та. Хабаровск: Хабар. гос. техн. ун-т, 1998. С. 75–80.

Ryabukhin P.B., Abuzov A.V. Aerostatic Aircrafts and Their Use in the Forest Industry. *Issues of Improvement of Technologies and Equipment in the Timber Industry Complex and Construction: Jubilee Collection of Academic Papers of the Far Eastern Forestry Institute*. Khabarovsk, KSUT Publ., 1998, pp. 75–80.

18. Aglietti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2032–2040. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.43332>

19. Avery R.B. *Mathematical Model for Determining the Position and Line Tensions for a Tethered Logging Balloon*. Corvallis, OR, Oregon State University, 1984. 78 p.

20. Avery R.B. Pendulum-Swing Balloon Logging: Developing and Applying a Static Lift Prediction Model. *Forest Products Journal*, 1986, vol. 36(3), pp. 17–22.

21. *Balloon Logging Systems. Phase I – Analytical Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 110 p.

22. *Balloon Logging Systems. Phase II – Logistics Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 171 p.

23. Graeter W.F. *Tethered Balloon Transport Systems: A Proposal*. MS Thesis. Monterey, CA, Naval Postgraduate School, 1978. 229 p.
24. Lambert C. *Dynamics and Control of a Multi-Tethered Aerostat Positioning System*. PhD Thesis. Monreal, Canada, McGill University, 2006. 164 p.
25. Lambert C., Nahon M. An Aerostat Positioning System with Cable Control. *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control*. Seoul, Korea, 2008, pp. 779–784.
26. Lambert M.B., Hoke D., Bergstrom G. Lighter-Than-Air Logging under Multiple-Tethered Ground Control. *Proceeding of the International Mountain Logging and Eighth Pacific Northwest Skyline Symposium, Bellevue, Washington, December 14–16, 1992*. Bellevue, WA, 1992. pp. 108–120.

TECHNOLOGIES OF INTERMEDIATE FELLING IN DIFFICULT TO ACCESS AREAS

Alexandr V. Abuzov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAK-3854-2021](https://orcid.org/0000-0003-1082-9392),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

Pavel B. Ryabukhin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAK-3906-2021](https://orcid.org/0000-0003-1735-1942),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru, 000340@pnu.edu.ru

Abstract. The development of technologies and equipment that meet modern requirements of forest preservation and a gentle mode of forest exploitation becomes a relevant issue within the framework of the implementation of the sustainable forest management principles both at forestry enterprises and in the organization of forestry. Such technologies include developed and field-tested experimental methods of logging using balloon-rope systems for various types and methods of felling. Of particular interest is the concept of using this equipment based on the purpose logging and the environmental and forestry requirements for their implementation. The paper has informative and cognitive nature; its purpose is to provide professionals with information on new technologies and designs of specialized equipment to ensure a gentle mode of forest management and forest exploitation. The article presents the results of theoretical research on possible directions of use of balloon-rope systems when working on forest sites of specially protected natural areas. The authors propose the designs of specialized equipment for the vertical removal of trees (whips) in the process of intermediate felling on the areas with signs of hard access and ecological dependence. Such mechanisms will significantly reduce energy costs when removing branches and limbs from a standing tree and its vertical removal from the plantation. The developed designs of specialized mechanisms for skidding a vertically standing tree without its landing in the form of a grabbing, grabbing-cutting and knot-cutting device with a grabber ensure the maximum possible preservation of the forest environment, since they do not cause damage to the nearby stand, the undergrowth or the soil.

For citation: Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Technologies of Intermediate Felling in Difficult to Access Areas. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 117–130. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-117-130

Keywords: intermediate felling, areas with signs of ecological dependence, balloon-rope system, load-grabbing mechanism, grabbing-cutting device, rope tension, contour of the forest area.

УДК 625.711.84:630.431:630.181.43

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-131-149

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЖАРОВ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ С УЧЕТОМ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Р.Н. Ковалев¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [B-3695-2017](https://orcid.org/0000-0001-8928-8765),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>

И.М. Еналеева-Бандура², канд. техн. наук, науч. сотр.;

ResearcherID: [AAK-5364-2021](https://orcid.org/0000-0001-7032-9512), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

А.В. Никончук², канд. техн. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAI-9139-2021](https://orcid.org/0000-0002-9159-7978),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9159-7978>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: kir9624@yandex.ru

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; e-mail: melnikov1978@inbox.ru, n_alex_krsk@mail.ru

Аннотация. В настоящее время отсутствует единое научное понимание определения величины общего эколого-экономического ущерба от лесных пожаров на основе экосистемного подхода, учитывающего многостороннее назначение лесных благ и зависимость достижения эффективности лесохозяйственных и противопожарных мероприятий от уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда. Цель статьи – разработка методики оценки величины эколого-экономического ущерба от пожаров лесным экосистемам с учетом фактора планирования лесной дорожной сети и ее апробация. Исследованы вопросы, касающиеся необходимости прогнозирования вероятности возникновения лесных пожаров, площади их распространения по территории лесного фонда, оценки возможного эколого-экономического ущерба лесным экосистемам. Изучение данных вопросов необходимо для своевременного проведения противопожарных и лесовосстановительных мероприятий, а также для определения величины оптимальных резервов, достаточных для ликвидации последствий лесных пожаров, оценки сопряженности показателя общего эколого-экономического ущерба от пожаров лесным экосистемам с непосредственно влияющим на этот показатель уровнем развития транспортной сети. Приведена разработанная авторами математическая модель, положенная в основу предлагаемого метода оценки величины эколого-экономического ущерба от пожаров лесным экосистемам с учетом фактора планирования создания и развития лесной дорожной сети. Разработка базируется на инструментарии экономико-математического моделирования, элементах теории вероятности и комбинаторики, а также комплексном междисциплинарном подходе к объекту исследования. Также описаны результаты расчетно-численного эксперимента при помощи разработанного методологического аппарата. Предложенная авторами методика может быть использована при выявлении наиболее пожароопасных территорий лесного фонда, разработке мероприятий по сохранению биоразнообразия, планировании рубок, лесовосстановительных работ и др.

Для цитирования: Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Никончук А.В. Оценка влияния пожаров на лесные экосистемы с учетом уровня развития лесотранспортной сети // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 131–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-131-149

Ключевые слова: лесные пожары, земли лесного фонда, эколого-экономический ущерб, лесная дорожная сеть.

Введение

Пожары – один из наиболее мощных экологических факторов – оказывают многогранное влияние на лесные биогеоценозы, уничтожая органический слой почвы, вызывая ее сильную эрозию и загрязняя атмосферу продуктами горения. Тушение лесных пожаров необходимо, но высокочрезмерно, что обусловлено прежде всего отсутствием на территориях лесного фонда страны достаточно развитой транспортной системы лесного фонда (ТСЛФ). ТСЛФ является неотъемлемым компонентом современной лесной экосистемы [25] и способствовала бы не только тушению пожаров и выполнению работ по восстановлению древостоев с наименьшими затратами, но и обеспечивала бы проведение всего комплекса противопожарных мероприятий. Возникает экономическая дилемма. С одной стороны, задача формирования новой ТСЛФ в целом и ее дорожной сети в частности требует значительных финансово-материальных ресурсов, с другой – высокие денежные затраты на тушение лесных пожаров обусловлены прежде всего отсутствием развитой транспортной сети на территории лесного фонда. Критерием принятия решения в пользу проекта ТСЛФ является снижение эколого-экономического ущерба лесным биогеоценозам посредством планирования, создания и развития на территориях лесного фонда эффективных дорожных систем. Их наличие способствует повышению уровня лесопользования и лесовосстановления в послепожарный период, своевременному тушению возникающих очагов и проведению всего комплекса противопожарных мероприятий. Кроме того, согласно [3], при наличии дорожной сети сокращается средняя площадь распространения лесных пожаров, а следовательно, и размер ущерба от их воздействия. Таким образом, перечисленные положительные факторы влияния наличия современных ТСЛФ обуславливают окупаемость ее проекта посредством снижения величины обозначенного ущерба, который можно отнести к потерям в лесном хозяйстве от бездорожья.

Объекты и методы исследования

С позиций хозяйствующих субъектов эколого-экономический ущерб, наносимый лесными пожарами, можно обозначить как сумму затрат на охрану лесов, тушение пожаров и величины снижения стоимости выгоревшего участка леса (лесопокровной территории). Данная сумма, как правило, определяется натуральными показателями и их экономическими оценками, изменяющимися согласно пространственно-временной динамике восстановления территорий лесного фонда после пожара. По данным источника [13], размер ущерба от лесных пожаров в Российской Федерации за последние 6 лет (по годам) составил: более 40 млрд руб. – в 2020–2019 гг.; 16,9 млрд руб. – в 2018 г.; 25,2 млрд руб. – в 2017 г.; более 23 млрд руб. – в 2016 г. и 56,4 млрд руб. – в 2015 г. От 3 до 7 млрд в каждом из указанных значений занимает ущерб лесному хозяйству (потери древесины) – обесценивание свыше 200 млн м³ древесины. Лесные пожары повреждают или уничтожают ценную деловую породу и пагубно влияют на возобновление ее ресурсов, что в среднем составляет 18 % от общего ущерба. Остальные потери – расходы на тушение и последующую расчистку горелых площадей, ущерб от гибели животных, загрязнения продуктами горения, затраты на восстановление леса и т. д. составляют 82 % от величины общего ущерба. Следует отметить, что, согласно [21], затраты на обустройство, строительство и уход за проти-

вопожарными объектами (дороги, канавы, полосы) составляют около 15 % от общих затрат. С учетом этих данных очевидно, что разработка мероприятий по снижению величины ущерба лесным территориям от пожаров является актуальной научной задачей.

При этом большое значение имеет прогнозирование вероятности возникновения пожаров и их возможного распространения на площадях лесного фонда в целях своевременного проведения противопожарных мероприятий. Прогнозная величина обозначенного ущерба также является важным эколого-экономическим показателем, поскольку она позволит заранее сформировать в бюджете необходимый фонд на покрытие затрат, связанных с тушением лесных пожаров, которые не удастся предотвратить в будущих пожароопасных периодах хозяйствования. Таким образом, очевидна необходимость разработки метода оценки величины данного ущерба с учетом фактора наличия и планирования развития ТСЛФ на основе принципов экосистемного подхода.

Вопросам прогнозирования возникновения лесных пожаров и ущерба окружающей среде от их воздействия посвящено много научных исследований [4, 5, 8–11, 14–23, 28–33]. В качестве критериальных значений эколого-экономической оценки урона, наносимого территориям лесного фонда пожарами, в научной литературе [5, 7, 8–10, 16, 18, 21–23] используются показатели, базирующиеся на величине затрат на охрану лесов и тушение возгораний, на снижении стоимости (в том числе и кадастровой) пройденных огнем лесных площадей.

При разработке методов оценки эколого-экономического ущерба лесным экосистемам рекомендуют [5, 6–10, 21–23, 26] учитывать сокращение объемов древесного сырья, изменение средоформирующих и социальных функций лесов. Так, например, предлагается [21] величину потенциального ущерба формировать в соответствии с динамикой лесных территорий. Ее следует рассматривать как пространственно-временную трансформацию в лесной экосистеме посредством изменения биометрических параметров, интенсивности физиологических, биохимических и биофизических процессов. Очевидно, что критерии оценки ущерба должны учитывать такие особенности, наиболее важной из которых является временной фактор. Данная составляющая при эколого-экономической оценке ущерба лесным экосистемам состоит в приведении к сопоставимому виду их настоящих и будущих показателей в денежном эквиваленте [11], что выражается преимущественно в необходимости объективного сравнения затрат настоящего момента (в т. ч. затрат на тушение пожаров и лесовосстановление) и изменения будущих эффектов лесных территорий в связи с последствиями от прохождения огня.

В научной литературе отсутствуют исследования по теме улучшения продуктивности лесопользования посредством создания и повышения уровня развития ТСЛФ, которая позволит провести весь комплекс лесохозяйственных мероприятий после лесных пожаров, а также противопожарных мероприятий. Кроме того, остаются открытыми вопросы: насколько при наличии достаточно развитой транспортной сети уменьшится эколого-экономический ущерб, причиненный пожаром лесным экосистемам; появится ли возможность более точно прогнозировать ущерб и ускорить процесс лесовосстановления. Таким образом, возникает необходимость дальнейшей проработки поставленной оптимизационной задачи.

Авторами предложен теоретический аппарат с однозначным описанием всех зависимостей, входящих в математическую модель определения прогнозной величины эколого-экономического ущерба от лесных пожаров с учетом фактора планирования ТСЛФ. В целях обоснования эффективности метода произведены экспериментальные расчеты. В качестве пилотной территории принято Енисейское лесничество Красноярского края, для наглядности разделенное на участковые лесничества. В табл. 1 приведены кварталы, в которых за исследуемый нами период имелись возгорания (использовались данные за 3 года, поскольку выполнение расчета для большего временного промежутка достаточно трудоемко при отсутствии программного обеспечения, разрабатываемого на данный момент авторами), а также площади лесных территорий, пройденные пожарами.

Таблица 1

Исходные данные для расчета прогнозной величины эколого-экономического ущерба от лесных пожаров за 3 года

Участковое лесничество	Квартал участкового лесничества с зафиксированными очагами возгорания			Пройденная огнем территория лесного фонда на момент ликвидации пожара, га					
				Покрытая лесом			Не покрытая лесом		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Озерновское	53, 48, 85, 8, 45, 16, 42, 11, 88, 18, 43, 17, 47, 16, 10	5, 9, 21, 11, 50, 36, 54, 19, 41, 23, 13, 71, 31, 2, 18, 37	45, 30	371,6	587,0	54	264	64	0
Чалбышевское	4, 9, 13, 9, 65, 26, 118, 9, 129	19, 7, 53, 36, 51, 43	25, 39, 6	759,0	217,2	7,5	716	90	8
Назимовское	868, 793, 387, 760, 388, 792, 565, 1152, 761, 1151, 1100, 562, 1153	1100	1095, 411, 651	3612,0	0,6	33	210	0	0
Маклаковское	117, 25, 65, 83, 52, 3, 44	116, 116, 2, 44	44, 44, 104	230,8	328,0	58	36	16	0
Лосиноборское	279, 306, 231, 232	669, 268, 348, 305, 348, 744	430	1304,0	220,0	190	6	54	0
Рудиковское	160, 78	–	–	11,0	–	–	0	–	–
Усть-Питское	279, 196, 20	–	300	267,0	–	3	0	–	0
Каргинское	90, 8, 96	25	115	12,0	110,0	75	0	70	0
Енисейское	340, 498	1267, 1719	–	1,3	86,0	–	0	0	–
Епишинское	123, 62	171	–	24,0	168,0	–	0	12	–

При расчете суммарного ущерба по видам лесопользования, а также затрат на тушение лесных пожаров и строительство транспортной сети были использованы, кроме того, приведенные в табл. 2 показатели за отчетный временной интервал.

Таблица 2

Дополнительные исходные данные для расчета прогнозной величины эколого-экономического ущерба от лесных пожаров

Планирование транспортной сети, руб./км	Средняя скорость распространения огня, км/ч v	Коэффициент временной коррекции восстановления K_t^i	Коэффициент дисконтирования финансовых потоков e	Временной интервал вероятностного возникновения k -х пожаров ($t; \tau$)	Удельная оценочная стоимость функции поглощения CO_2 , руб./га в год, C^b	Коэффициент оборота рубки $K_p^{\text{об}}$
1 500 000	7	1	0,068	30.04.21; 20.10.21	1758	8,64

В качестве исходных данных для составления прогнозной оценки величины эколого-экономического ущерба, нанесенного древостоям огнем, выступали карты лесных пожаров по кварталам участковых лесничеств за 2018–2020 гг. (на рис. 1–3 отмечены очаги возгорания [12]) и таксационные данные [14].

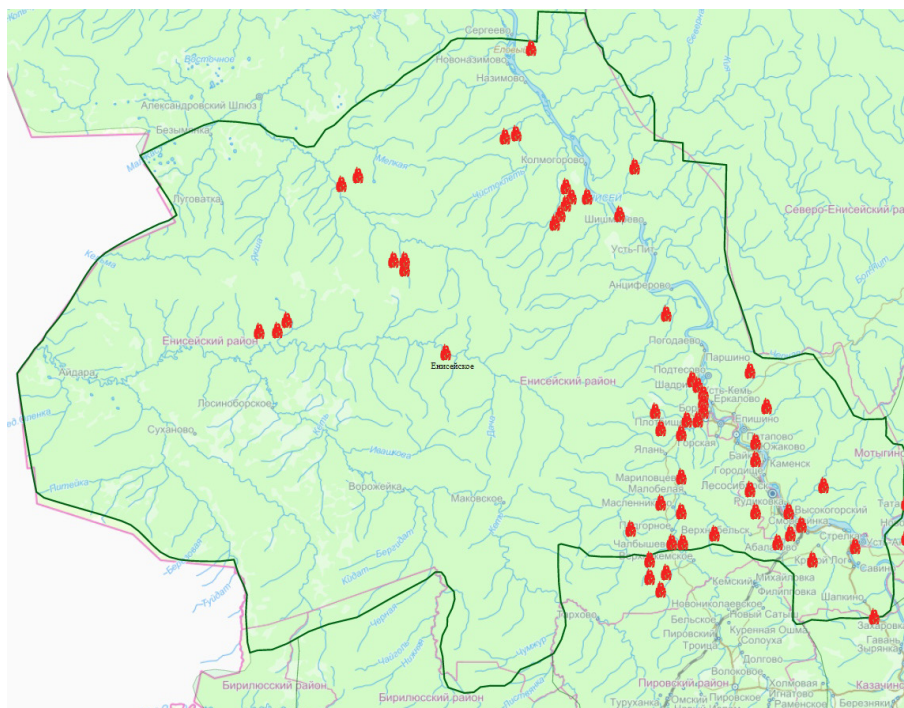


Рис. 1. Карта пожаров в Енисейском лесничестве за 2018 г.

Fig. 1. Map of fires in the Yenisey forestry for 2018

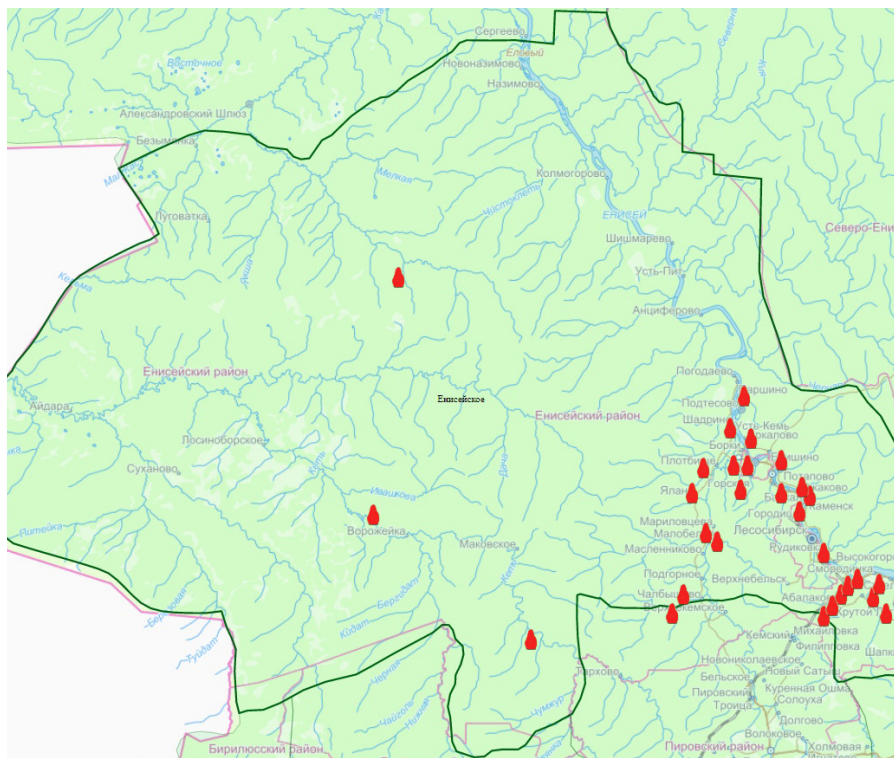


Рис. 2. Карта пожаров в Енисейском лесничестве за 2019 г.

Fig. 2. Map of fires in the Yenisey forestry for 2019

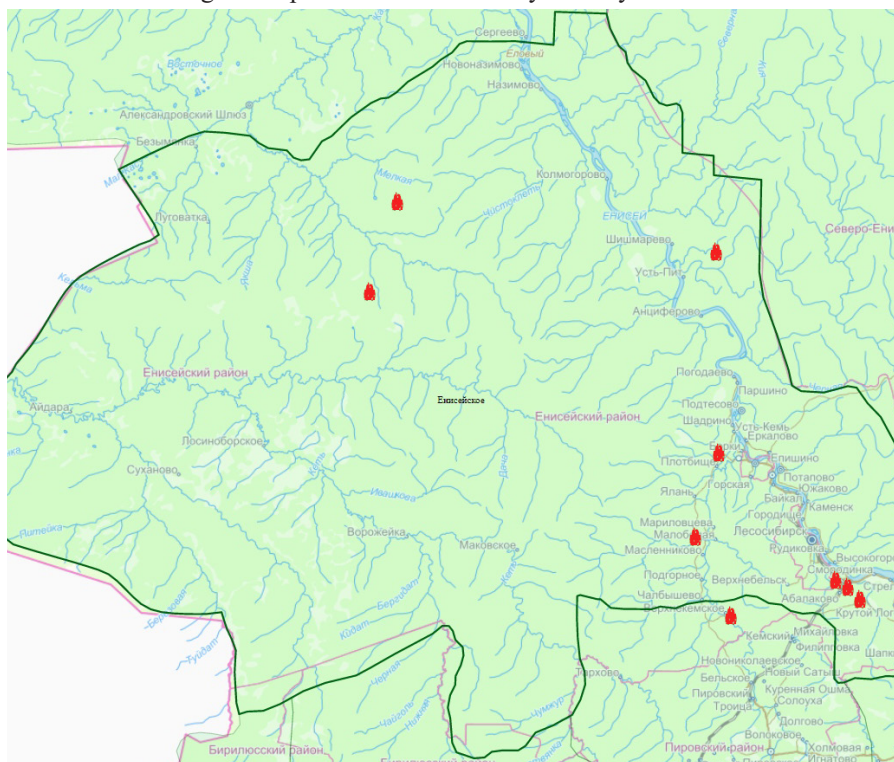


Рис. 3. Карта пожаров в Енисейском лесничестве за 2020 г.

Fig. 3. Map of fires in the Yenisey forestry for 2020

Также в качестве исходных данных использованы сведения из источников [10, 18, 27, 30] о: годовой ставке лесных податей, взимаемых за подсочку 1 га насаждений; возможном ущербе из-за снижения почвозащитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и других средообразующих функций леса; коэффициенте поглощения CO_2 лесами j -породы i -го га и др.

Посредством анализа статистических данных о лесных пожарах в Енисейском лесничестве за последние 3 года (2018–2020 гг.) были определены в процентном соотношении причины возгораний, из которых пожары из-за гроз составили 31,5 %, по вине населения – 47,5 %, от линейных объектов (линии электропередачи, авто- и железных дорог, трубопроводов) – 4 %, остальные 17 % пожаров перешли с земель иных категорий.

В июле 2020 г. в Назимовском и Лосиноборском участковых лесничествах по естественным причинам возникло 3 крупных пожара, которые не были своевременно ликвидированы, из-за чего пострадало 4230 га покрытых лесом территорий, т. е. 48 % от общего числа земель, пострадавших от огня за 3 года. Данное обстоятельство обусловлено отсутствием транспортной сети (при прогнозировании данные значения учтены как величины случайного характера). Назимовское и Лосиноборское участковые лесничества находятся на северо-западе Енисейского лесничества и имеют наименьшую транспортную доступность и наибольшую площадь сгоревших территорий среди всего Енисейского лесничества, достигающую 5359 га за 3 года, что составляет 61 % от общего числа пройденных пожарами лесных территорий. В особенности это касается Лосиноборского лесничества, где около 100 % возгораний объясняется природным фактором.

Наибольшая доля лесных пожаров приходится на Озерновское лесничество – 29 %, схожая ситуация в Чалбышевском – 22 % и Малакавском – 13 % лесничествах. Основная причина возгораний – антропогенный фактор: недалеко расположена река и крупный населенный пункт (г. Лесосибирск), есть достаточно развитая дорожная сеть. Тем не менее, благодаря той же сети, лесные пожары в Озерновском лесничестве редко разрастаются до 2 га и более и могут быть быстро ликвидированы [12].

Вблизи Енисейского (4 %), Каргинского (3%), Епишинского (2 %) и Рудиковского (2%) лесничеств также расположены села и деревни – все пожары возникали по вине населения [12].

Усть-Питское участковое лесничество относится к отдельной группе. Оно находится поодаль от крупных населенных пунктов и при этом имеет относительно плотную дорожную сеть на небольшом участке. За 3 года на данной территории возникло 4 пожара, два из которых – по вине человека – не превысили порог в 2 га, у двух пожаров (причина – гроза) диапазон составил 100 га. Оставшиеся 3 участковых лесничества имеют наибольшее число возгораний от гроз (91 %), а также область распространения пожаров, достигающую 100 га и более [12].

В статье описаны результаты проведенного авторами исследования, а именно разработка названного методологического аппарата.

Результаты исследования и их обсуждение

В предложенном методе оценки величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам в соответствии с принципами экосистемного подхода учитываются в динамике факторы сокращения объема лесных ресурсов и изменения средоформирующих и социальных функций леса в послепожарный период. Данный метод позволяет принять во внимание фактор планирования ТСЛФ, поскольку наличие достаточно развитой ТСЛФ дает возможность качественного проведения комплекса лесовосстановительных работ, посредством которых выращивается высокопродуктивная и высококачественная древесина на площадях, пройденных огнем. Прогнозируемый эколого-экономический ущерб (ресурсному потенциалу лесов, средоформирующим и социальным функциям) с учетом пространственно-временной динамики в лесных экосистемах определяется выражением

$$\begin{cases} Y_{\text{сум}}^{\text{общ}} = Y_{\text{ед}}^{\text{общ}} S_k^{\text{пп}}; \\ Y_{\text{ед}}^{\text{общ}} = Z_T + \sum_{t=0}^T Z_{\text{стр}} \sum_{l=0}^L (Z_l^a + P^c + Y^c) K_l^t \rightarrow \min, \end{cases}$$

где $Y_{\text{ед}}^{\text{общ}}$ – прогнозная удельная величина эколого-экономического ущерба лесным экосистемам на 1 га лесных земель, руб./га; $S_k^{\text{пп}}$ – прогнозная суммарная площадь распространения k -х пожаров на участках лесного фонда с l -м лесным ресурсом, $l \in [1, \dots, L]$, га; Z_T – прогнозируемые удельные затраты на тушение k -х пожаров на 1 га лесных земель, $k \in [0, \dots, K]$ (в приведенной методологической разработке величины задаются определенным интервалом, например показатель L – это конечное значение по сумме лесных ресурсов, т. е. сколько их всего пострадало в отчетном периоде. Таким образом задается сумма, означающая, что расчеты будут производиться по каждому лесному ресурсу от 1-го до L (m , n или K) руб./га); $Z_{\text{стр}}$ – суммарные удельные затраты на планирование ТСЛФ по периодам времени t с учетом необходимости планирования дополнительной дорожной сети, руб./га; Z_l^a – прогнозируемые удельные затраты на восстановление l -го лесного ресурса на 1 га лесных земель, руб./га; P^c – прогнозируемые суммарные удельные потери валовой выручки по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда на 1 га лесных земель, руб./га; Y^c – прогнозируемый суммарный удельный ущерб (прямой и косвенный) от повреждения ресурсов по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда на 1 га лесных земель, руб./га; K_l^t – коэффициент временной коррекции восстановления l -го лесного ресурса (поправка на географическое положение, климатические условия и т. п.); ввод в модель данного коэффициента обусловлен тем, что восстановление леса во многом зависит от климата. Так, на севере сосне или лиственнице, чтобы вырасти во взрослое дерево, потребуется около 100 лет, а на юге – около 60–70 лет [15, 24].

Прогнозируемые суммарные затраты на тушение лесных пожаров включают в себя следующее: расходы на заработную плату (с начислениями) и питание рабочих лесхоза, сотрудников других организаций и предприятий, иных категорий работников; содержание баз авиационной охраны лесов; стоимость

услуг машин, тракторов, других механизмов, в том числе собственных, рассчитанная исходя из отработанных смен; цену средств пожаротушения и других грузов; почтово-телеграфные и прочие расходы, предусмотренные действующим законодательством. Прогнозируемые суммарные затраты на лесовосстановление после пожаров: расходы на расчистку горельников и приведение их в состояние, пригодное для лесного хозяйства и лесопользования, а также на дополнительные санитарные рубки (сплошные и выборочные) в насаждениях, пройденных огнем и т. п. Прогнозируемые суммарные потери валовой выручки по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда определяются следующим выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_c = \frac{\sum_{t=0}^T (\Pi_g(t) + \Pi_{\text{под}}(t) + \Pi_{\text{поб}}(t) + \Pi_{\text{пф}}(t))}{(1+e)^T}; \\ \Pi_g(t) = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^K [C_{ij}^c(t) Q_{ij}^c(t) + C_{ij}^m(t) Q_{ij}^m(t)]; \\ \Pi_{\text{под}}(t) = C^{\text{год}} K_{\text{р}}^{\text{об}}; \\ \Pi_{\text{поб}}(t) = 100 C_{\text{в}}^{\text{год}}; \\ \Pi_{\text{пф}}(t) = \sum_{t=0}^T (Q_{ij}^3(t) K_{ij}^{\text{пог}}(t)) C_{\text{в}}; \\ T = \sum_{t=0}^T t. \end{array} \right.$$

где Π_g – возможные удельные потери валовой выручки посредством отпуска древесины на корню (второстепенных лесных ресурсов) на 1 га лесных земель, руб./га, на момент времени t ; $\Pi_{\text{под}}$ – возможные удельные потери валовой выручки от подсочки на 1 га леса, руб./га; $\Pi_{\text{поб}}$ – прогнозные удельные потери валовой выручки от побочного лесопользования: туризма, охоты, спорта и других целей – принимается согласно [15] равным стократной величине годового размера лесных податей, взимаемых за соответствующий вид лесопользования на оцениваемом участке лесных земель, руб./га; $\Pi_{\text{пф}}$ – возможные удельные потери валовой выручки от продуцирования углерододепонирующей функции лесов на 1 га леса, руб./га; C_{ij}^c – стоимость на момент составления прогноза удельных потерь древесины на корню в средневозрастных, приспевающих, спелых и перестойных насаждениях, руб./га; C_{ij}^m – прогнозируемый удельный ущерб от повреждения молодняков естественного и искусственного происхождения, руб./га; $C^{\text{год}}$ – годовая ставка лесных податей, взимаемых за подсочку 1 га насаждений; $K_{\text{р}}^{\text{об}}$ – коэффициент оборота рубки, изменяется от 16,39 до 4,59 при обороте рубки от 50 до 120 лет соответственно; $C_{\text{в}}^{\text{год}}$ – годовой размер лесных податей, взимаемый за соответствующий вид лесопользования [4]; Q_{ij}^3 – удельный объем потерянных (согласно прогнозируемой площади распространения k -х пожаров) запасов лесов j -породы на i -м гектаре $i \in [1, \dots, m]$, $j \in [1, \dots, n]$, м³/га; $K_{ij}^{\text{пог}}$ – коэффициент поглощения CO₂ лесами j -породы на i -м га [27]; $C_{\text{в}}$ – удельная оценочная стоимость функции поглощения CO₂ на момент времени t , руб./га; T – период прогнозного восстановления территории лесного фонда, лет; t – время прогнозного восстановления j -породы на i -ом гектаре, $t \in [0, \dots, T]$, лет.

Следует отметить, что оценка возможной потери древесины и насаждений производится по действующим в момент составления прогноза ставкам лесных податей за древесину, т. е. с учетом реальной потребительской стоимости этого товара.

Прогнозный суммарный ущерб (согласно прогнозируемой площади распространения k -х пожаров) по его видам за весь период восстановления территории лесного фонда определяется следующим выражением:

$$y_c = \sum \frac{Y_3 + Y_B + Y_\Gamma + Y_y + Y_{ог}}{(1+e)^t} \left(1 + \frac{1}{(1+e)^T} \right) \rightarrow \min,$$

где Y_3 – возможный ущерб от снижения почвозащитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и других средообразующих функций леса, руб./га; Y_B – возможный ущерб от загрязнения воздушной среды продуктами горения; пока не разработаны нормативы объемов сгорания органических веществ при лесных пожарах, принимается равным 10 % от суммарного ущерба, причиняемого огнем, в виде стоимости потерь древесины на корню и ущерба от повреждения молодняков, руб./га; Y_Γ – прогнозный ущерб от гибели животных и растений, включая виды, занесенные в Красную книгу; пока нет нормативов, принимается за 5 % от ущерба (однако на сегодняшний день Минприроды России повысило в 400 раз совокупную стоимость российской флоры и фауны [1]), выражается стоимостью потерь древесины на корню и ущербом от повреждения молодняков искусственного и естественного происхождения, руб./га; Y_y – прогнозный удельный ущерб от повреждения ресурсов побочного лесопользования, руб./га; $Y_{ог}$ – стоимость сгоревших объектов и готовой продукции в лесу на момент составления прогноза (снижение стоимости объектов и готовой продукции, поврежденных пожаром), включает: возможный ущерб от возникновения лесных пожаров, повреждения или уничтожения зданий, сооружений, другого имущества лесхоза, находящегося в лесу, и ущерб от возникновения лесных пожаров, повреждения или уничтожения заготовленной лесной продукции, который определяется исходя из рыночной цены и объема уничтоженной продукции или процента снижения ее товарной ценности, руб./га.

Прогнозная суммарная площадь распространения k -х пожаров (S_k^{np}) на участках лесного фонда определяется как математическое ожидание возникновения лесного пожара согласно выражению

$$\left\{ \begin{array}{l} S_k^{np} = M[k]; \\ M[k] = \sum_{t=0}^T \sum_{k=0}^m R_k P_k; \\ P_k = \frac{[P(A)P(A_w / A) + P(E)P(E_w / E) - P(A)P(E)P(A_w E_w / A, E)]}{P(LH / H)}; \\ R_k = \int_{t_B}^{t_T} (\nu \prod_{g=1}^b g_b) dt; \\ \sum_{k=0}^m [t_B; t_T] \in (t; \tau), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $M[k]$ – математическое ожидание возникновения k -х пожаров, га; R_k – вероятность возникновения k -го пожара; P_k – прогнозируемая интенсивность распространения k -го пожара по территории лесного фонда, га; $P(A)$ – вероятность посещения человеком территории лесного фонда. $P(A_w/A)$ – вероятность наличия источников огня при условии, что лесная территория посещается людьми; $P(E)$ – вероятность грозы; $P(E_w)$ – вероятность естественного возгорания при условии, что идет гроза; $P(A_w, E_w/A, E)$ – вероятность совместного действия антропогенного и естественного источника огня при условии, что территория лесного фонда посещается людьми и это же время идет гроза; $(t; \tau)$ – временной интервал вероятностного возникновения k -х пожаров; t_b, t_t – момент времени вероятностного возникновения и вероятностного тушения k -го пожара соответственно; v – прогнозируемая скорость распространения k -го пожара; $\prod_{g=1}^b g_b$ – рассматривается нами как произведение влияния различных факторов на интенсивность распространения k -го пожара по территории лесного фонда, таких как природно-климатические и географические условия, возможные временные потери при тушении k -го пожара и т. д., $g \in (1, \dots, b)$.

При реализации предложенной нами математической модели метода оценки величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам с учетом фактора планирования ТСЛФ нужно принимать во внимание следующие ограничения:

1) окупаемость проекта планирования ТСЛФ:

$$Y_6^{\text{общ}} > Y_{\text{сум}}^{\text{общ}},$$

где $Y_6^{\text{общ}}$ – прогнозируемый совокупный эколого-экономический ущерб лесным экосистемам без учета строительства и эксплуатации ТСЛФ, руб.;

2) финансовая устойчивость предприятия, инвестирующего в проект планирования ТСЛФ:

$$\sum_{t=0}^T Z_{\text{стр}}^{\text{общ}} \leq P_{\text{max}},$$

где $\sum_{t=0}^T Z_{\text{стр}}^{\text{общ}}$ – совокупные затраты на планирование транспортной сети на территории лесного фонда за период времени T , руб.; P_{max} – финансовые возможности предприятия, руб.;

3) транспортная доступность лесных площадей с высокой вероятностью возникновения пожара.

Согласно [4], эффективное плечо доставки рабочих бригад и спецтехники до i -го лесного участка от j -го пункта отправления не должно превышать доступное с экономической точки зрения расстояние доставки:

$$L_{ij} \leq L_{\text{дост}},$$

где L_{ij} – расстояние между i -м лесным участком и j -м пунктом отправления рабочих бригад и спецтехники, км.

Предлагаемая модель в динамической постановке обеспечивает корректное прогнозирование величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам с учетом фактора планирования (создания и развития) ТСЛФ. На базе представленного в статье методологического аппарата будет разработана информационно-аналитическая система прогнозной оценки эколого-экономического ущерба от лесных пожаров. Данное программное обеспечение станет

полезным при выработке стратегии лесохозяйственных мероприятий, направленных на охрану, защиту и воспроизводство лесов.

В целях обоснования представленного в статье метода рассмотрим использование разработанного теоретического аппарата на практическом примере. Согласно выражению (1) определим вероятность возникновения k -х лесных пожаров. Результат прогностических расчетов представлен на рис. 4 (анализу подлежал не каждый квартал участковых лесничеств, просчитаны вероятности возникновения k -х лесных пожаров, на прогнозную карту-схему занесены очаги возгорания, вероятность возникновения которых составляет более 50 %).

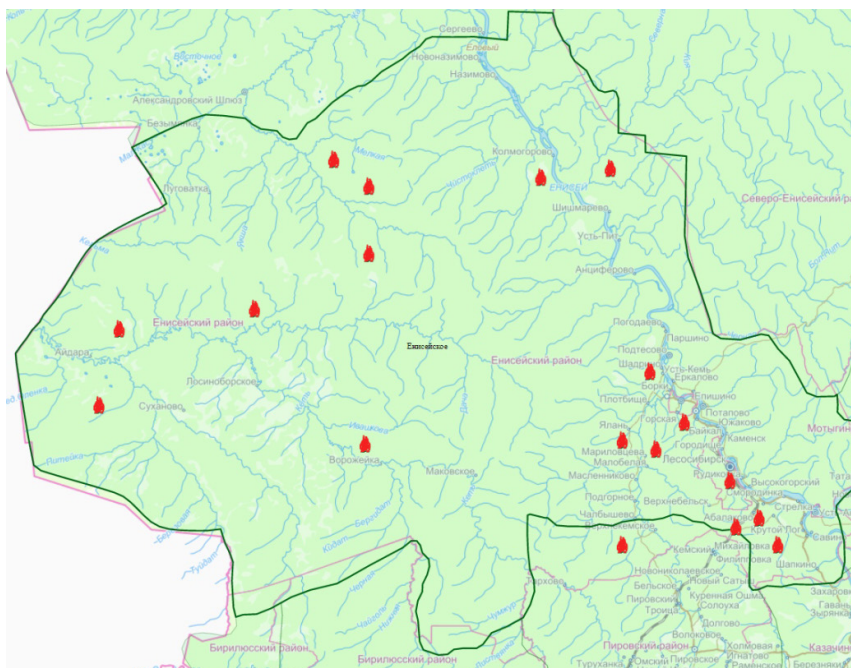


Рис. 4. Прогнозная карта лесных пожаров на 2021 г.

Fig. 4. Forecast map of forest fires for 2021

Согласно расчетным данным, представленным на рис. 4, наибольшая вероятность возникновения пожаров по причине антропогенного фактора существует в юго-восточной части Енисейского лесничества, в местах пролегания участков дорожной сети, характеризующейся высокой плотностью вблизи крупных населенных пунктов. Прогнозируемая скорость распространения данных пожаров ввиду наличия транспортной сети не превысит порог в 2 га. На северо-западе Енисейского лесничества дорог мало, основная их доля приходится на лесовозные и лесные пути, поэтому процент возникновения в этой области лесных пожаров по вине населения фактически отсутствует, в качестве основной причины выступают грозовые разряды. Прогнозируемая скорость распространения здесь огня ввиду отсутствия транспортной сети превысит порог в 100 га. Пожары в северо-восточной и южной частях лесничества могут происходить по разным причинам, но, согласно статистическим данным, бывают крайне редко.

Таким образом, с учетом факторов, влияющих на интенсивность распространения k -х пожаров (природно-климатических и географических условий, возможных временных потерь при тушении k -го пожара [2, 12]), прогнозная суммарная площадь их распространения составит 4496,27 га. На базе карты лесных пожаров (рис. 4) посредством разработанного методологического аппарата рассчитаем предполагаемую величину эколого-экономического ущерба лесным экосистемам. Для этого определим прогнозируемые: суммарные затраты на тушение и ликвидацию негативных последствий лесных пожаров с учетом уровня развития лесотранспортных сетей; потери валовой выручки и суммарный ущерб от повреждения ресурсов по видам лесопользования за весь период восстановления территории. Результаты произведенных расчетов следующие:

1) прогнозируемые суммарные удельные потери валовой выручки по видам лесопользования:

от подсочки леса, 16 425 000 руб./га;

от побочного лесопользования: туризма, охоты, спорта и др., 4 068 816 руб./га;

от продуцирования углерододепонирующей функции лесов, 216 316 800 руб./га;

посредством отпуска древесины на корню, $5\,271\,428,9 \cdot 10^{-6}$ руб./га;

по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда, 382 542 196,7 руб./га;

2) прогнозная оценка суммарного ущерба от повреждения ресурсов по видам лесопользования:

от снижения почвозащитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и других средообразующих функций леса, 6 998 888 руб./га;

от загрязнения воздушной среды продуктами горения, 6 998 888 руб./га;

от гибели животных и растений, включая виды, занесенные в Красную книгу, 438 642,4 руб./га;

от повреждения ресурсов побочного лесопользования, 686 720 руб./га;

примерная стоимость сгоревших объектов и готовой продукции в лесу на момент составления прогноза, 87 728,48 руб./га;

по видам лесопользования за весь период восстановления территории, 49 325 205,7 руб./га.

Исходя из анализа результативных расчетных показателей произведенного эксперимента на обозначенной пилотной территории можно заключить следующее:

в целях снижения величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам на территории Енисейского лесничества необходимо усилить наблюдение за местами возможных очагов возгораний согласно прогнозной карте лесных пожаров на 2021 г.;

в западной части Енисейского лесничества лесные пожары, возникающие из-за грозных разрядов, имеют катастрофический характер ввиду транспортной недоступности данной лесной территории – на ней требуется развитие лесной дорожной сети в целях оперативной ликвидации очагов возгораний и последствий лесных пожаров;

для снижения количества лесных пожаров, возникающих по вине человека, следует чаще проводить противопожарную пропаганду среди местного населения, использовать штрафные санкции к виновникам возгораний.

Заключение

Тушение лесных пожаров необходимо, но высокзатратно, что обусловлено в том числе отсутствием на территориях лесного фонда страны достаточно развитой транспортной системы. Такая система является неотъемлемым компонентом современного лесного биогеоценоза и способствовала бы не только тушению пожаров и последующему проведению лесовосстановительных работ с наименьшими затратами, но и обеспечивала бы выполнение всего комплекса противопожарных мероприятий.

В настоящее время нет единого научного подхода к определению величины общего эколого-экономического ущерба от лесных пожаров на основе экосистемного принципа, учитывающего многостороннее назначение лесных благ и уровень развития транспортной сети, непосредственно влияющий на этот показатель. Остаются открытыми вопросы сокращения вреда, наносимого пожарами экосистемам, прогнозирования величины ущерба и ускорения процесса лесовосстановления под влиянием транспортного фактора.

Предлагаемый метод оценки величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам с учетом фактора обеспечения транспортной доступности территорий, на которых они располагаются, позволит производить: более точное прогнозирование вероятности возникновения на конкретных участках возгораний, разработку рациональных стратегий их предотвращения и создание оптимальных резервов, достаточных для устранения последствий лесных пожаров, которые не удалось предотвратить. Метод учитывает сокращение количества лесных ресурсов и изменение средоформирующих и социальных функций леса в динамике в послепожарный период.

Посредством расчетно-численного эксперимента была определена прогнозная оценка величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам Енисейского лесничества. Результативные показатели экспериментальных вычислений составили: суммарные затраты на тушение k -х пожаров, 26 296 400 руб./га; суммарные затраты на восстановление l -го лесного ресурса, 31 554 784 руб./га; суммарные затраты на планирование транспортной сети на территории лесного фонда, 45 000 000 руб./га; потери валовой выручки и суммарный ущерб от повреждения ресурсов по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда, 382 542 196,7 руб./га и 49 325 205,7 руб./га соответственно; величина и суммарная величина эколого-экономического ущерба лесным экосистемам, 534 718 586,4 руб./га и 2 406 235,5 тыс. руб. соответственно; период восстановления территории лесного фонда, 95 лет.

Из приведенных расчетов следует, что затраты на строительство лесных дорог составляют 8,4 % от величины прогнозируемого ущерба лесным экосистемам от пожаров. Следовательно, развитие лесной дорожной сети на пилотной территории является целесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Апулеев И.* Миллиарды за зверя: Минприроды обновило стоимость фауны // Газета.ru. 2019. 20 сент. Режим доступа: <https://www.gazeta.ru/business/2019/09/20/12663211.shtml> (дата обращения: 29.09.2019).
Apuleyev I. Billions for the Beast: The Ministry of Natural Resources Has Updated the Cost of Fauna. *Gazeta.Ru*. 2019.
2. Архив погоды в Енисейске // ООО «Расписание Погоды». Режим доступа: https://rp5.by/Архив_погоды_в_Енисейске (дата обращения: 25.02.2021).
Weather Archive in Yeniseisk. ООО «*Raspisaniye Pogody*». 2021.
3. *Болданова Е.В., Богомолова Е.Ю., Давыдова Г.В.* Многомерная характеристика влияния плотности лесных дорог на объем лесовосстановления и площадь лесных пожаров // Изв. Байкал. гос. ун-та. 2017. Т. 27, № 3. С. 350–358.
Boldanova E.V., Bogomolova E.Y., Davydova G.V. Multidimensional Characteristics of the Influence of Forest Road Density on the Volume of Reforestation and the Area of Forest Fires. *Izvestiya Baykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University], 2017, vol. 27, no 3. pp. 350–358. DOI: [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27\(3\).350-358](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27(3).350-358)
4. *Болотов О.В., Ельдештейн Ю.М., Болотова А.С., Горяева Е.В., Мохирев А.П.* Основы расчета и планирования устойчивого управления лесопользованием: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2005. 183 с.
Bolotov O.V., Eldestein Yu.M., Bolotova A.S., Goryayeva E.V., Mokhirev A.P. *Fundamentals of Calculation and Planning of Sustainable Forest Management*: Monograph. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2005. 183 p.
5. *Буряк Л.В., Иванов В.А., Зленко Л.В.* Лесообразовательный процесс в нарушенных пожарами светлехвойных насаждениях Нижнего Приангарья // Фундаментальные исследования. 2015. № 2(8). С. 1709–1714.
Buryak L.V., Ivanov V.A., Zlenko L.V. Forest Formation Processes in Violation Fire Light Coniferous Plantations Lower Angara Region. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2015, no. 2(8), pp. 1709–1714.
6. *Бутусов О.Б., Редикутьева Н.И., Никифорова О.П.* Балансовая математическая модель динамики лесных гарей // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 5(47), ч. 6. С. 75–79.
Butusov O.B., Redikultseva N.I., Nikiforova O.P. Balance Mathematical Model of Burnt-out Forests Areas Dynamics. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2016, no. 5(47), part 6, pp. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.156>
7. *Васильев Д.В.* Анализ естественного и искусственного возобновления на гарях 2010 года для выявления оптимальных условий после пожарного лесовосстановления в Юринском лесничестве // Мир науки и инноваций. 2015. Т. 15. С. 37–42.
Vasil'yev D.V. Analysis of Natural and Artificial Regeneration on Burned Areas in 2010 to Determine the Optimal Conditions after Fire Reforestation in Yurino Forestry. *Mir nauki i innovatsiy* [World of science and innovation], 2015, vol. 15, pp. 37–42.
8. *Волокитина А.В.* Методические аспекты характеристики лесных участков после пожара // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2015. № 3(31). С. 84–98.
Volokitina A.V. Methodical Aspects for Describing Post-Fire Forest Site. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2015, no. 3(31), pp. 84–98. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/31/7>
9. *Гаврилова О.И., Пак К.А.* Естественное восстановление леса после пожаров в республике Карелия // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 38–44.

Режим доступа: https://www.natural-sciences.ru/pdf/2017/2017_12.pdf (дата обращения: 01.06.2021).

Gavrilova O.I., Pak K.A. Natural Forest Restoration after Fires in the Republic of Karelia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2017, no. 12, pp. 38–44.

10. Громская Л.Я., Артемьев В.В., Левушкин Д.М. Методика определения стоимости строительства лесных автомобильных дорог // Лесн. вестн. 2019. Т. 23, № 1. С. 77–83.

Gromskaya L.Ya., Artem'yev V.V., Levushkin D.M. Method of Determining Forest Roads Construction Cost. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-1-77-83>

11. Денисов С.А., Конюхова Т.А., Рачкова Т.С. Управление лесовосстановлением на горяч // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 3(27). С. 5–17. Режим доступа: <https://www.volgatech.net/upload/iblock/3a0/3a06706417d5d74b6ce111bfb38e30a6.pdf> (дата обращения: 01.06.2021).

Denisov S.A., Konukhova T.A., Rachkova T.S. Forest Restoration Management at the Fire Sites. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2015, no. 3(27), pp. 5–17.

12. КГАУ «Лесопожарный центр». Режим доступа: <http://www.lpcentr.ru/> (дата обращения: 25.02.2021).

KGAU "Forest Fire Center". 2021.

12. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды // ТАСС. 2019. 29 июля. Режим доступа: <https://tass.ru/info/6712527> (дата обращения: 31.05.2021).

Forest Fires in Russia. Statistics and Anti-Records. TASS. 2019.

14. Лесохозяйственный регламент Северо-Енисейского лесничества: в ред. приказов министерства лесного хозяйства Красноярского края от 11.04.2019 № 676-од, от 20.01.2020 № 86-102-од, от 20.04.2020 № 86-742-од, от 12.03.2021 N 86-508-од. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/550243026> (дата обращения: 25.02.2021).

Forest Management Regulations of the North-Yenisey Forestry: As Amended by the Orders of the Ministry of Forestry of Krasnoyarsk Krai of April 11, 2019 No. 676-od, of January 20, 2020 No. 86-102-od, of April 20, 2020 No. 86-742-od, of March 12, 2021 No. 86-508-od.

15. Макаров В.П., Малых О.Ф., Горбунов И.В., Пак Л.Н., Зима Ю.В., Банищикова Е.А., Желибо Т.В. Влияние пожаров на флористическое разнообразие сосновых лесов Восточного Забайкалья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 77–86.

Makarov V.P., Malykh O.F., Gorbunov I.V., Pak L.N., Zima Yu.V., Banshchikova E.A., Zhelibbo T.V. Influence of Fires on Pine Forest Floristic Diversity of the Eastern Transbaikalian Territory. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.77>

16. Матвеева Т.А., Матвеев А.М. Экологическая роль лесных пожаров // Успехи современного естествознания. 2012. № 10. С. 107–109. Режим доступа: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=30894> (дата обращения: 22.09.2019).

Matveyeva T.A., Matveyev A.M. Ecological Role of Forest Fires. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2012, no. 10, pp. 107–109.

17. Мусеева Е.Е., Южаков Д.В. Экономическая эффективность противопожарных мероприятий // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2009. № 23. С. 211–214. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22747020> (дата обращения: 01.06.2021).

Moiseyeva E.E., Yuzhakov D.V. Economic Efficiency of Fire Prevention Measures. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, no. 23, pp. 211–214.

18. Морозова А. Сколько стоит потушить лесные пожары в Сибири. Три варианта // 66.ru. 2019. 1 авг. Режим доступа: <https://66.ru/news/society/223701/> (дата обращения: 25.02.2021).

Morozova A. How Much Does It Cost to Extinguish Forest Fires in Siberia. Three Options. *Network Publication "Modern Portal of Yekaterinburg – 66.ru"*. 2019.

19. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 8 июля 2014 г. № 313 «Об утверждении Правил тушения лесных пожаров» (с изменениями и дополнениями на 16 февр. 2017 г.) // Гарант.Ру: информ.-прав. портал. Режим доступа: <https://base.garant.ru/71674632/> (дата обращения: 22.02.2021).

Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation of July 8, 2014 No. 313 "On Approval of the Rules for Extinguishing Forest Fires".

20. Потанова Е.В. Экономическая оценка ущербов лесам от пожаров с учетом экологических рисков (на территории Свердловской области) автореф. дис. ... канд. экон. наук. Новосибирск, 2006. 22 с.

Potapova E.V. *Economic Assessment of Forest Damage from Fires, Taking into Account Environmental Risks: In the Sverdlovsk Region*: Cand. Econ. Sci. Diss. Abs. Novosibirsk, 2006. 22 p.

21. Потанова Е.В. Математический подход к оценке величины ущерба лесным экосистемам // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2007. Т. 2, № 2. С. 190–194.

Potapova E.V. A Mathematical Approach to Assessing the Damage to Forest Ecosystems. *Interekspo Geo-Siberia*, 2007, vol. 2, no. 2, pp. 190–194. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403353>

22. Сныткин Г.В. Лесные пожары и борьба с ними на Крайнем Северо-Востоке Сибири: дис... д-ра с.-х. наук. М., 2002. 314 с.

Snytkin G.V. *Forest Fires and Fight against Them in the Far North-East of Siberia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Moscow, 2002. 314 p.

23. Хильченко Н.В., Литвинова А.А., Пашина О.С. Оценка эколого-экономического ущерба (методы и практика): [методика]. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2004. 32 с.

Khil'chenko N.V., Litvinova A.A., Pashnina O.S. *Assessment of Ecological and Economic Damage (Methods and Practice)*. Yekaterinburg, Institute of Economics UB RAS Publ., 2004. 32 p.

24. Bouchard M., Pothier D. Long-Term Influence of Fire and Harvesting on Boreal Forest Age Structure and Forest Composition in Eastern Québec. *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 261, iss. 4, pp. 811–820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.11.020>

25. Burke C.P., Jones D.L. On the Polarity and Continuing Current in Unusually Large Lightning Flashes Deduced from ELF Events. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1996, vol. 58, iss. 5, pp. 531–548. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00054-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00054-2)

26. Carrasco L.R., Nghiem T.P.L., Sunderland T., Koh L.P. Economic Valuation of Ecosystem Services Fails to Capture Biodiversity Value of Tropical Forests. *Biological Conservation*, 2014, vol. 178, pp. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.007>

27. Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko E.P., Ivanova G.A. Determining Effects of Area Burned and Fire Severity on Carbon Cycling and Emissions in Siberia. *Climatic Change*, 2002, vol. 55, iss. 1-2, pp. 197–211. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020207710195>

28. González Cabán A. Wildland Fire Management Policy and Fire Management Economic Efficiency in the USDA Forest Service. *Proceedings of the IV International Wildland Fire Conference*. Seville, Spain, 2007. 17 p. Available at: <http://gfmc.online/iwfc/sevilla-2007/Keynote-Gonzales-Caban.pdf> (accessed 22.02.21).

29. Hansen A.J., Spies T.A., Swanson F.J., Ohmann J.L. Conserving Biodiversity in Managed Forests: Lessons from Natural Forests. *BioScience*, 1991, vol. 41, iss. 6, pp. 382–392. DOI: <https://doi.org/10.2307/1311745>

30. Martinez-Harms M.J., Bryan B.A., Balvanera P., Law E.A., Rhodes J.R., Possingham H.P., Wilson K.A. Making Decisions for Managing Ecosystem Services. *Biological Conservation*, 2015, vol. 184, pp. 229–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.01.024>

31. Schaich H., Milad M. Forest Biodiversity in a Changing Climate: Which Logic for Conservation Strategies? *Biodiversity and Conservation*, 2013, vol. 22, iss. 5, pp. 1107–1114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0491-7>

32. Soriano L.R., de Pablo F., Tomas C. Ten-Year Study of Cloud-to-Ground Lightning Activity in the Iberian Peninsula. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, vol. 67, iss. 16, pp. 1632–1639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.08.019>

33. Venier L.A., Thompson I.D., Fleming R., Malcolm J., Aubin I., Trofymow J.A., Langor D., Sturrock R., Patry C., Outerbridge R.O., Holmes S.B., Haeussler S., de Grandpré L., Chen H.Y.H., Bayne E., Arsenault A., Brandt J.P. Effects of Natural Resource Development on the Terrestrial Biodiversity of Canadian Boreal Forests. *Environmental Reviews*, 2014, vol. 22(4), pp. 457–490. DOI: <https://doi.org/10.1139/er-2013-0075>

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FIRES ON FOREST ECOSYSTEMS CONSIDERING THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF THE FOREST TRANSPORTATION NETWORK

*Rudolf N. Kovalev*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [B-3695-2017](https://orcid.org/0000-0001-8928-8765),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>

*Irina M. Enaleeva-Bandura*², Candidate of Engineering, Research Scientist;
ResearcherID: [AAK-5364-2021](https://orcid.org/0000-0001-7032-9512), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

*Alexandr V. Nikonchuk*², Candidate of Engineering, Research Scientist;
ResearcherID: [AAI-9139-2021](https://orcid.org/0000-0002-9159-7978), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9159-7978>

¹Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: kir9624@yandex.ru

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gaz. «Krasnoyarskiy rabochiy», 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; e-mail: melnikov1978@inbox.ru, n_alex_krsk@mail.ru

Abstract. Currently, we can state the fact that there is no developed unified scientific approach to determining the degree of the total ecological and economic damage from forest fires based on the ecosystem approach, taking into account the multipurpose of forest benefits and the dependence of achieving the effectiveness of forestry and fire-fighting measures on the level of development of the transportation network on the territory of the forest fund. Hence, we can conclude that the development of a method for assessing the magnitude of ecological and economic damage from fires to forest ecosystems considering the factor of planning a forest road network is an urgent scientific issue. In this regard, the purpose of the article is to develop a methodology for assessing the degree of ecological and economic damage from fires to forest ecosystems, taking into account the planning factor of the forest road network and its testing. Within this framework, the article outlines the issues under study concerning the need for forecasting: the probability of forest fires, the area of their spread over the territory of the forest fund, the assessment of the degree of the possible ecological and economic damage to forest ecosystems. The study of these issues is necessary for the timely implementation of fire-prevention and restoration measures, as well as the determination

of the value of optimal reserves sufficient to eliminate the consequences of forest fires, the assessment of the correlation of the indicator of total ecological and economic damage from fires with the level of development of the transportation network, which directly affects this indicator. The article presents a mathematical model developed by the authors, which forms the basis of the proposed method for assessing the degree of ecological and economic damage from fires considering the factor of planning the creation and development of the forest road network. The presented methodological development is based on the tools of economic and mathematical modeling, elements of the theory of probability and combinatorics, as well as an integrated interdisciplinary approach to the research object. The article also presents the results of a computational and numerical experiment using the developed methodological apparatus. The methodology proposed by the authors can be used in identifying the most fire-hazardous areas of the forest fund, development of measures to preserve biodiversity, planning logging, reforestation work, etc.

For citation: Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Nikonchuk A.V. Assessment of the Impact of Fires on Forest Ecosystems Considering the Level of Development of the Forest Transportation Network. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 131–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-131-149

Keywords: forest fires, forest fund lands, ecological and economic damage, forest road network.

УДК 630*383

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-150-161

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ
ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ****А.О. Боровлев¹, соискатель;** *ResearcherID: [AAL-8641-2021](https://orcid.org/0000-0002-5431-9944),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5431-9944>***А.В. Скрыпников¹, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID: [AAE-8824-2019](https://orcid.org/0000-0003-1073-9151),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>***В.Г. Козлов², д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID: [G-9613-2017](https://orcid.org/0000-0003-2571-8687),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>***Т.В. Турикова³, канд. техн. наук, доц.;** *ResearcherID: [P-8991-2019](https://orcid.org/0000-0002-3592-310X),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>***О.Н. Тверитнев¹, соискатель;** *ResearcherID: [AAE-1352-2021](https://orcid.org/0000-0002-8183-0393),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>***В.В. Никитин⁴, канд. техн. наук, доц.;** *ResearcherID: [AAE-9971-2019](https://orcid.org/0000-0001-5284-8116),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5284-8116>*

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, просп. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия, 394036; e-mail: borov.borov.ar@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru, tveritneffo@yandex.ru

²Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, д. 1, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: t.turikova@narfu.ru

⁴Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005; e-mail: box534@mail.ru

Аннотация. Осуществление задач, связанных с развитием транспортной сети и лесовозных автомобильных дорог как неотъемлемой ее части, требует исследования закономерностей образования пространственных кривых при сочетании элементов плана и продольного профиля, т. к. рациональное проложение трассы на многие годы определяет ее важнейшие транспортно-эксплуатационные характеристики (скорость, уровень безопасности движения, пропускную способность). Учет зрительного восприятия дороги водителем повысит качество проектных решений, что позволит избежать возникновения аварийных ситуаций в дальнейшем, после введения трассы в эксплуатацию. Снижение скорости перед кажущимися резкими поворотами дороги негативно сказывается на эффективности работы лесовозного автомобильного транспорта, поэтому вид дороги в перспективе должен ориентировать водителя, т. е. быть зрительно ясным, явно меняющимся, обеспечивающим постоянство или плавное снижение скорости транспортного потока. Необходимость удачного пространственного решения дороги при этом повышается. В проектах лесовозных автомобильных дорог в качестве элементов плана трассы встречаются прямые линии, переходные кривые, описываемые в последние годы чаще всего по клотоиде, и круговые кривые. Установлено, что вид дороги в перспективе является зрительно понятным для водителя при условии, что линии, описывающие бровки дорожного полотна и кромки проезжей части, в перспективном изображении изогнуты в том же направлении, что и в плане дороги. Цель работы – определение комплекса количественных показателей (кривизны, радиуса кривой в плане, максимальной кривизны, максимальной скорости изменения кривизны) для оптимизации зрительной плавности и ясности центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых. Приведенный алгоритм обеспечивает возможность составления компьютерной программы для определения названных показателей, что позволит оценить зрительную плавность и ясность центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых на лесовозных автомобильных дорогах.

Для цитирования: Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Тюрикова Т.В., Тверитнев О.Н., Никитин В.В. Математическое моделирование трассы лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 150–161. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-150-161

Ключевые слова: пространственные кривые, проложение трассы, зрительная ясность, криволинейный участок, лесовозные дороги.

Элементами плана лесовозных автомобильных трасс являются в том числе прямые линии, переходные кривые, описываемые в настоящее время по клотоиде, и круговые кривые [1–3, 8, 9, 11–13, 16–19]. Кривые линии могут быть разделены при анализе перспективных изображений по направлению их изогнутости на левые и правые, а переходные кривые – по их отношению к направлению движения лесовозного подвижного состава на входные и выходные. Продольный профиль, как правило, проектируют, используя горизонтальные и наклонные прямые, вогнутые и выпуклые параболы (или круговые кривые). Обычно применяемые элементы плана и профиля трассы могут образовывать 28 взаимных сочетаний (комбинаций) [4–7]. Таким образом, путем сочетания элементов плана и профиля получаем элементы трассы в пространстве.

Цель работы – определение комплекса количественных показателей (кривизны, радиуса кривой в плане, максимальной кривизны, максимальной скорости изменения кривизны) для оптимизации зрительной плавности и ясности центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых.

Пространственную кривую, графическая модель которой представлена на рис. 1, аналитически можно описать следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(s); \\ y &= y(s); \\ z &= z(s). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В качестве параметра выступает путь s , отсчитываемый от точки зрения (ТЗ) водителя лесовоза, взятой за начало правой системы координат O , главный луч зрения берется за ось X . Плоскость изображения $Y_c O_c Z_c$ принята перпендикулярной к оси X .

Координаты центральной проекции ($Y_c Z_c$) любой из линий, определяющих дорожное полотно (кромки покрытия, бровки, ось), плоскость изображений, которая расположена на расстоянии a от ТЗ, находятся через систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} y_c &= \frac{ay}{x}; \\ x_c &= \frac{az}{x}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

в которой величины x , y и z , согласно (1), обозначают уравнения координат $x(s)$, $y(s)$ и $z(s)$ пространственной кривой. Следовательно, координаты перспективы пространственной кривой являются функциями одного параметра s .

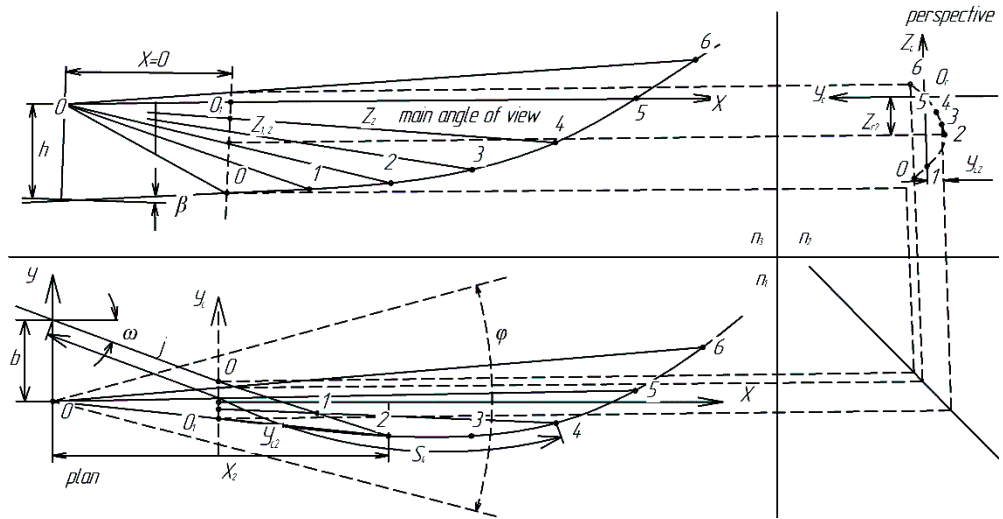


Рис. 1. Схема центрального проецирования пространственной кривой: 1 – горизонтальная плоскость проекции; 2 – фронтальная, 3 – профильная; 0 – расстояние от ТЗ до плоскости изображения $Y_c O_c Z_c$, φ – угол сектора изображения; (b, h) – координата начала проецируемой линии; β , ω – углы наклона проецируемой линии относительно оси X в профиле и плане; j – угловой коэффициент, соответствующий углу ω

Fig. 1. Diagram of the central projection of the spatial curve: 1 – horizontal projection plane (PP), 2 – frontal PP, 3 – profile PP; 0 – distance from the viewpoint to the image plane $Y_c O_c Z_c$, φ – image sector angle; (b, h) – coordinate of the beginning of the projected line; β , ω – angles of inclination of the projected line about the x-axis in the profile and plan; j – angular coefficient corresponding to the angle ω

В случае параметрического задания плоской кривой ее изогнутость выражается формулой

$$K_c = \frac{z'_c y''_c - z''_c y'_c}{(y'^2_c + z'^2_c) 3/2}. \quad (3)$$

Значения производных y'_c , y''_c , z'_c , z''_c получаем, дифференцируя по параметру s уравнения перспективных координат (2), где

$$\begin{aligned} y'_c &= \left(\frac{ay}{x} \right)' = \frac{a(xy' - yx')}{x^2} = \frac{ap}{x^2}; \\ y''_c &= \left(\frac{ap}{x^2} \right)' = \frac{a(xp' - 2px')}{x^3}; \\ z'_c &= \left(\frac{az}{x} \right)' = \frac{a(xz' - zx')}{x^2} = \frac{aq}{x^2}; \\ z''_c &= \left(\frac{aq}{x^2} \right)' = \frac{a(qx' - 2qx')}{x^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

В зависимостях (4) приняты следующие обозначения:

$$xy' - yx' = p; \quad xz' - zx' = q. \quad (5)$$

Производные этих величин по s :

$$p' = (xy' - yx')' = xy'' - yx''; \quad q' = (xz' - zx')' = xz'' - zx''. \quad (6)$$

Преобразовываем и упрощаем числитель выражения (3):

$$\begin{aligned} y_c''z_c' - y_c'z_c'' &= \frac{a^2(p'x - 2px')q}{x^3x^2} - \frac{a^2p(q'x - 2qx')}{x^2x^3} = \\ &= \frac{a^2(qp'x - 2qpx' - q'px + 2qpx')}{x^5} = \frac{a^2(qp' - pq')}{x^4} = \\ &= \frac{a[(xz' - zx')(xy'' - yx'') - (xy' - yx')(xz'' - zx'')]}{x^4} = \\ &= \frac{a^2[x^2z'y - xzx'y - xyz' + yzx'x - x^2y'z + xyx'z + xzy'x - yzx'x]}{x^4} = \\ &= \frac{a^2[(x^2z'y - y'z) + xy(x'z - z'x) + xz(y'x - x'y) + yz(x'x - x'x)]}{x^4} = \\ &= \frac{a^2[x(z'y - y'z) + y(x'z - z'x) + z(y'x - x'y)]}{x^3}. \end{aligned}$$

Преобразование и упрощение знаменателя выражения (3) дает:

$$\begin{aligned} (y_c'^2 + z_c'^2) \frac{3}{2} &= \left[\frac{a(xy' - yx')}{x^2} \right]^2 + \left[\frac{a(xz' - zx')}{x^2} \right]^2 = \\ &= \frac{a^3[(xy' - yx')^2 + (xz' - zx')^2]}{x^6}. \end{aligned}$$

Следовательно, кривизна

$$K_c = \frac{x^3[x(z'y - y'z) + y(x'z - z'x) + z(y'x - x'y)]}{a[(xy' - yx')^2 + (xz' - zx')^2]^{3/2}}. \quad (7)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} z'y'' - y''z' &= u; \\ x'z'' - z'x'' &= v; \\ y'x'' - x'y'' &= w. \end{aligned} \quad (8)$$

Формулу (7) можно представить в виде:

$$K_c = \frac{x^3(xu + yv + zw)}{a(p^2 + q^2)^{3/2}}. \quad (9)$$

Обозначив далее

$$\begin{aligned} xu + yv + zw &= U; \\ p^2 + q^2 &= V, \end{aligned} \quad (10)$$

получаем

$$K_c = \frac{x^3U}{aV^{3/2}}. \quad (11)$$

Плоскость изображения обычно принимают на расстоянии 1 м, поэтому в дальнейшем $a = 1$.

При контроле зрительной ясности пространственных кривых важно определить направление изогнутости их центральных проекций. Если центр кривизны лежит на положительной полупрямой нормали, то кривизна считается положительной полупрямой нормали, если на отрицательной – кривизна отрицательная [10, 14–17, 19].

В случае фиксированного положения ТЗ над полотном дороги направление изогнутости можно определить другим, более простым способом. Если центр кривизны находится влево от центральной проекции кривой, то кривизна, высчитанная по формуле (7), положительная, если центр кривизны справа – отрицательная.

Скорость изменения кривизны выражается 1-й производной от кривизны K'_c по параметру s . Исходя из формулы (11), получаем:

$$\frac{dK_c}{ds} = K'_c = \frac{x^2(3UVx' + UVx - 1,5UV'x)}{V^{5/2}}. \quad (12)$$

Зависимость (12) можно представить и в виде

$$K'_c = K_c \left[\frac{3x'}{x} + \frac{U'}{U} - \frac{1,5V'}{V} \right]. \quad (13)$$

В формулах (12) и (13) U' и V' являются производными функций $U(s)$ и $V(s)$:

$$U' = x'y + y'v + z'w + xu' + yv' + zw'; \quad (14)$$

$$V' = 2(pp' + qq');$$

$$u' = z'y''' - y'z''';$$

$$v' = x'z''' - z'x''';$$

$$w' = y'x''' - x'y'''. \quad (15)$$

Алгоритм определения K_c и K'_c следующий.

Сначала определяются производные:

$$x = x(s); x' = x'(s); x'' = x''(s); x''' = x'''(s);$$

$$y = y(s); y' = y'(s); y'' = y''(s); y''' = y'''(s);$$

$$z = z(s); z' = z'(s); z'' = z''(s); z''' = z'''(s).$$

$x(s)$, $y(s)$, $z(s)$ представляют собой уравнения пространственной линии. Штрихами обозначены производные по s .

Затем находим:

$$p = xy' - yx'; \quad p' = xy'' - yx''';$$

$$q = xy'' - yx'''; \quad q' = xz'' - zx''';$$

$$u = z'y'' - y'z''; \quad u' = z'y''' - y'z''';$$

$$v = x'z'' - z'x''; \quad v' = x'z''' - z'x''';$$

$$w = y'x'' - x'y''; \quad w' = y'x''' - x'y'''. \quad (15)$$

А также:

$$U = xu + yv + zw;$$

$$V = p^2 + q^2;$$

$$U' = xu' + yv' + zw' + x'u + y'v + z'w;$$

$$V' = 2(pp' + qq').$$

Тогда

$$K_c = \frac{x^3U}{V^{3/2}}; \quad K'_c = K_c \left[\frac{3x'}{x} + \frac{U'}{U} - \frac{1,5V'}{V} \right].$$

При формулировке задачи исследований предполагали, что наибольшая кривизна $K_{с,н}$ может быть одним из показателей зрительной плавности дороги. При этом под наибольшей кривизной понимается наибольшее ее значение на исследуемом криволинейном участке. Для доказательства возможности использования показателя $K_{с,н}$ установим связь между зрительной плавностью кромок проезжей части и соответствующими им графиками кривизны.

В качестве примера взят типичный участок трассы, состоящий из трех элементов: прямой, пространственной кривой и кривой (рис. 2). На рис. 3 представлено перспективное изображение этой части дороги.

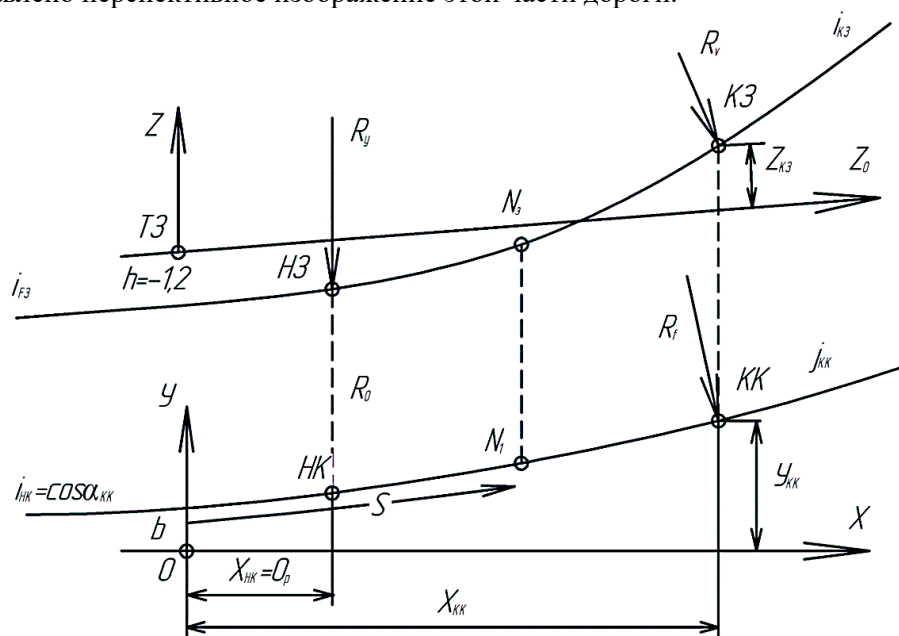


Рис. 2. Параллельные проекции пространственной линии (оси дороги) на профильной и горизонтальной плоскостях

Fig. 2. Parallel projections of the spatial line (road axis) on the profile and horizontal planes

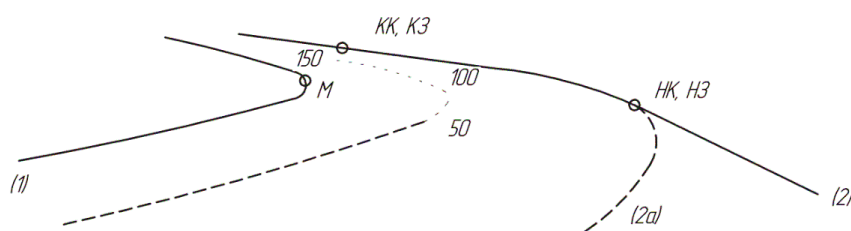


Рис. 3. Перспективное изображение участка дороги, ось которого показана на рис. 2: НК, М, КК – точки наибольшей кривизны

Fig. 3. Perspective image of the road section, the axis of which is shown in fig. 2 НК, М, КК – points of greatest curvature

При построении математических моделей участков трассы в дальнейшем будем использовать следующие обозначения:

b, h – прямоугольные координаты оцениваемой линии в плоскости YOZ , m (b – ширина ТЗ; h – высота ТЗ (уровень глаз водителя) относительно касательной к началу профильной проекции оцениваемой пространственной кривой);

D_p, D_v – расстояние от плоскости YOZ соответственно до точек начала кривых в плане НК и профиле НЗ, м;
 i – продольный уклон трассы;
 R_p – радиус кривой в плане, м;
 R_v – параметр параболы в продольном профиле, м;
 s – параметр (горизонтальная проекция пути с началом в плоскости YOZ), м.

Если принять ось X касательной к t_1 , началу кривой в плане, то участок трассы, показанный на рис. 2, можно задать по интервалам следующими системами уравнений:

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & 0 < s < s_{\text{НК}} \\ & \left. \begin{aligned} x &= s; \\ y &= b; \\ z &= h; \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & s_{\text{НК}} \leq s \leq s_{\text{КК}} \\ & \left. \begin{aligned} x &= D_p + R_p \sin \alpha \\ y &= b + R_p (1 - \cos \alpha) \\ z &= h + is + \frac{(s - D_v)^2}{2R_v} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & s_{\text{КК}} \leq s \\ & \left. \begin{aligned} x &= x_{\text{КК}} + (s - s_{\text{КК}}) \cos \alpha_{\text{КК}} \\ y &= y_{\text{КК}} + (s - s_{\text{КК}}) \sin \alpha_{\text{КК}} \\ z &= z_{\text{КК}} + (s - s_{\text{КК}}) \sin \beta_{\text{КК}} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

где α – угол поворота трассы в плане, рад, $\alpha = \frac{s - D_p}{R_p}$; $\alpha_{\text{КК}}$ – угол поворота трассы

в точке КК, рад, $\alpha_{\text{КК}} = \frac{s_{\text{КК}} - D_p}{R_p}$; $\beta_{\text{КЗ}}$ – угол поворота трассы в профиле в точке

КЗ, рад, $\beta_{\text{КЗ}} = \frac{s_{\text{КЗ}} - D_v}{R_v}$.

В таблице приведены результаты расчета изгиба по формуле (7) для кривой с параметрами $R_p = 500$ м; $R_v = 5000$ м. Координаты $b_{\text{л,кр}} = 5,0$ м; $b_{\text{п,кр}} = -2,0$ м; $h = -1,2$ м. $D_p = D_v = 60$ м. Шаг прироста аргумента $\Delta S = 10$ м.

Координаты графиков кривизны $K_c(s)$

s	0	10	20	30	40	50	60	60	70	80
$b_{\text{л,кр}}$		–	–	–	–	–	0	5,4	19,2	93,8
$b_{\text{п,кр}}$		0,38	4,87	34,5	128,0	66,0	34,0	34,1	15,2	8,1
s	90	100,0	110,0	120,0	130,0	140,0	150,0	160,0	160,0	200,0
$b_{\text{л,кр}}$	488,0	275,3	67,5	24,2	11,4	6,3	3,9	2,6	0	0
$b_{\text{п,кр}}$	4,9	3,1	2,2	1,6	0,9	0,8	0,7	0,6	0	0

По этим данным вычерчены графики кривизны левой и правой кромок проезжей части (рис. 4).

В целях выявления связи между зрительной плавностью кромок трассы и соответствующими графиками кривизны обратимся к рис. 3 и 4. Видно, что внутренняя кромка (линия 1) является менее плавной, чем внешняя (линия 2). Наибольшая изогнутость последней оказывается в интервале НК–КК. Это показывает и ее график кривизны $K_{c,1}(s)$. Точку наибольшей изогнутости 2 определить на глаз трудно, но по графику $K_{c,2}(s)$ видно, что ею является точка НК (точка максимальной изогнутости линии 2 в данном случае находится в интервале О–НК на не использованной для закругления угла поворота части кривизны).

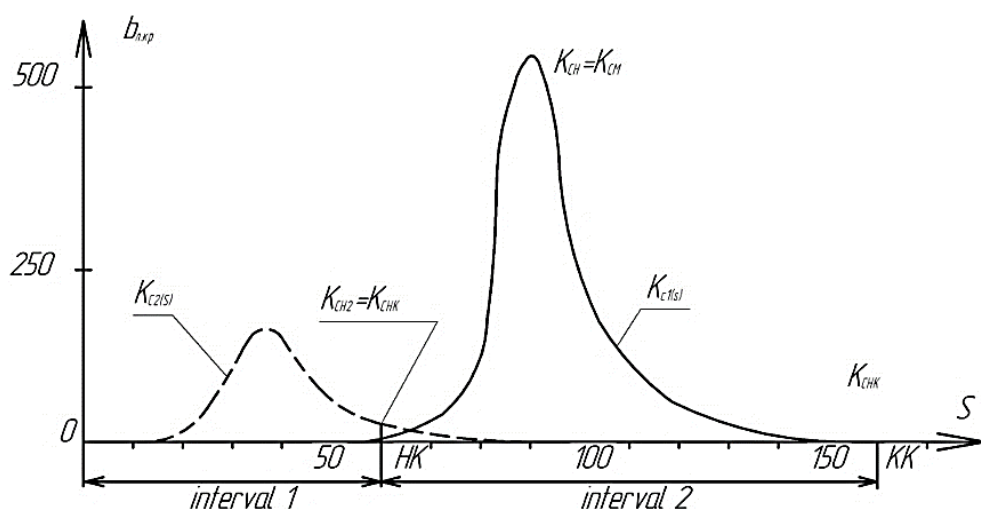


Рис. 4. Графики кривизны центральных проекций левой (1) и правой (2) кромок проезжей части

Fig. 4. Graphs of the curvature of the central projections of the left (1) and right (2) edges of the roadway

Таким образом, из анализа можно сделать следующие выводы: линия 1 наиболее изогнута в точке М, т. е. $K_{c,н,1} = K_{c,м}$; линия 2 – в точке НК, т. е. $K_{c,н,2} = K_{c,нк}$; $K_{c,н,2} < K_{c,н,1}$; линия 2 по качественной оценке плавнее линии 1; более плавной линии 2 соответствует меньшее значение наибольшей кривизны $K_{c,н,2}$.

Это свидетельствует о том, что максимальная изогнутость $K_{c,м}$, находящаяся в точке М вершин кривых, может быть использована в качестве количественного показателя зрительной плавности.

Частные значения кривизны $K_{c,м}$, $K_{c,нк}$ и $K_{c,кк}$ в дальнейшем рассматриваются отдельно, поскольку имеют самостоятельное значение при количественной оценке зрительной плавности пространственных кривых.

Заключение

На основе описательной характеристики дано математическое определение плавной линии. Под этим термином понимается криволинейный участок трассы 2-го и более высоких порядков гладкости. Показана разница между аналитически фиксируемой и зрительно воспринимаемой плавностью.

Установлено, что видимость дороги в перспективе правильно ориентирует водителя автомобиля при условии, что линии, описывающие бровки дорожного полотна и кромки проезжей части, в пространственном изображении изогнуты в том же направлении, что и в плане дороги. На этом основании сформулировано условие геометрического родства вида лесовозной автомобильной дороги в пространственной перспективе и ее плана. Оно позволяет аналитически проверить зрительную ясность криволинейных участков.

Выявлен комплекс количественных показателей: кривизна, радиус кривой в плане, максимальная кривизна и максимальная скорость изменения кривизны, – которые достаточно полно характеризуют зрительную плавность и ясность центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых.

В случаях, когда точка максимальной кривизны находится за пределами зоны видимости, за показатель плавности принимается изогнутость в точке, расположенной на границе видимости.

Кривизна и радиус кривой в плане служат для проверки зрительной ясности, а показатели частных значений кривизны – для оценки степени видимой плавности кривых.

Приведенный алгоритм позволит в будущем создать компьютерную программу для определения названных показателей и поможет быстро и качественно оценить как зрительную плавность, так и ясность кривых лесовозных автомобильных дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. М.: Транспорт, 1993. 271 с.
Babkov V.F. *Road Conditions and Traffic Safety*. Moscow, Transport Publ., 1993. 271 p.
2. Бирюля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
Birulya A.K. *Operation of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1966. 326 p.
3. Гулевский В.А., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Экспериментальная оценка сцепных качеств и ровности покрытий при различных состояниях автомобильных дорог и погодных условиях // Вестн. Воронеж. гос. аграр. ун-та. 2018. № 1(56). С. 112–118.
Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Experimental Evaluation of Traction Properties and Road Evenness in Various Road and Weather Conditions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Voronezh State Agrarian University], 2018, no. 1(56), pp. 112–118. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.1.112>
4. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 2012. 424 с.
Dryu D. *Theory of Traffic Flows and Their Management*. Moscow, Transport Publ., 2012. 424 p.

5. Иванов В.Н., Ерохов В.Н. Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10–13.

Ivanov V.N., Erokhov V.N. Influence of Parameters of Roads on Fuel Consumption. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2014, no. 8, pp. 10–13.

6. Калужский Я.А., Бегма И.В., Кисляков В.М., Филиппов В.В. Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1969. 136 с.

Kaluzhskiy Ya.A., Begma I.V., Kislyakov V.M., Filippov V.V. *Application of Queueing Theory in the Design of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1969. 136 p.

7. Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2017. 406 с.

Kozlov V.G. *Methods, Models and Algorithms for Designing Timber Roads Considering the Impact of Climate and Weather on Traffic Conditions*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arkhangel'sk, 2017. 406 p.

8. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Микова Е.Ю., Могутнов Р.В., Чуриков Е.В. Формирование модели проектирования системы «дорожные условия – транспортные потоки» и пути ее реализации // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1(29). С. 100–111.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mikova E.Yu., Mogutnov R.V., Chirikov E.V. Formation of the Model of Designing the System “Road Conditions – Transport Flows” and Ways of Its Implementation. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 1(29), pp. 100–111. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbe6ece23.91630316

9. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Могутнов Р.В., Микова Е.Ю., Зеликова Ю.А. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 156–168.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mogutnov R.V., Mikova E.Yu., Zelikova Yu.A. Comprehensive Experimental Research of Changing Parameters and Characteristics of Road Conditions, Transport Flows and Motion Modes under Influence of Climate and Weather. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 156–168. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b240611858af4.37544962

10. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутнов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 117–127.

Kozlov G.V., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichiy S.A., Mogutnov R.V. Theoretical Foundations and Methods of Mathematical Modeling of Forestry Roads. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.117>

11. Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В. Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3-2(33). С. 272–275.

Kondrashova E.V., Skvortsova T.V. Improvement of Road Traffic Organization in the Forest Complex Transport Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* [Automation and Remote Control], 2008, no. 3-2(33), pp. 272–275.

12. Сильянов В.В., Ситников Ю.М. Расчет скоростей движения при проектировании автомобильных дорог // Тр. МАДИ. 1974. Вып. 72. С. 47–66.

Sil'yanov V.V., Sitnikov Yu.M. Calculation of Traffic Speeds in the Design of Roads. *Trudy MADI*, 1974, iss. 72, pp. 47–66.

13. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Лесн. вестн. 2017. Т. 21, № 6. С. 43–49.

Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Assessment of the Impact on the Speed of the Constant Parameters of the Plan and Profile in the Various States of the Road Surface. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2017, vol. 21, no. 6, pp. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-6-43-49>

14. Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.

Khomyak Ya.V. *Designing Road Networks*. Moscow, Transport Publ., 1983. 207 p.

15. Чернышова Е.В. Алгоритм решения задачи оптимального трассирования лесовозной автомобильной дороги на неоднородной местности // Вестн. ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 2(72). С. 113–120.

Chernyshova E.V. Algorithm for Solving the Problem of Optimal Tracing of a Timber Road on a Non-Uniform Terrain. *Vestnik Voronežskogo gosudarstvennogo universiteta inženernyh tekhnologij* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2017, vol. 79, no. 2(72), pp. 113–120. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-113-120>

16. Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines – One of the Key Problems of Engineering Science. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings HMM 2000*. Ed. by M. Ceccarelli. Dordrecht, Springer, 2000, pp. 325–332. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9554-4_37

17. Kozlov V.G., Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of Individual Forecasting of Technical State of Logging Machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, iss. 4, art. 042056. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042056>

18. Mogutnov R.V., Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Zavrzhnov A.I., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Mikheyev N.V. Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the Main Parameter of the System. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” Dedicated to the 85th Anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.165>

19. Skrypnikov A., Dorokhin S., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 511–515.

MATHEMATICAL MODELING OF THE ROUTE OF LOGGING ROADS

Anton O. Borovlev¹, External PhD Student; ResearcherID: [AAL-8641-2021](https://orcid.org/0000-0002-5431-9944),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5431-9944>

Alexey V. Skrypnikov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAE-8824-2019](https://orcid.org/0000-0003-1073-9151),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

Vyacheslav G. Kozlov², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [G-9613-2017](https://orcid.org/0000-0003-2571-8687),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>

Tatyana V. Tyurikova³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [P-8991-2019](https://orcid.org/0000-0002-3592-310X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>

Oleg N. Tveritnev⁴, External PhD Student; ResearcherID: [AAE-1352-2021](https://orcid.org/0000-0002-8183-0393),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>

Vladimir V. Nikitin⁴, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-9971-2019](https://orcid.org/0000-0001-5284-8116), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5284-8116>

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, prosp. Revolyutsii, 19, Voronezh, 394036, Russian Federation; e-mail: borov.borov.ar@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru, tveritneffo@yandex.ru

²Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great, ul. Michurina, 1, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: t.turikova@narfu.ru

⁴Bauman Moscow State Technical University (National Research University), ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1, Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail: box534@mail.ru

Abstract. The implementation of tasks related to the development of the transportation network as a whole and logging roads as an integral part of it requires scientifically based theoretical studies of the patterns of formation of spatial curves when combining elements of the plan and the longitudinal profile, since the rational laying of the route for many years determines its most important transport and operational characteristics (speed, traffic safety, traffic capacity). Consideration of the visual perception of the road by the driver will improve the quality of design decisions, which will allow to avoid emergencies in the future after setting the route into service. On the other hand, a decrease in speed before seemingly sharp turns of the road affects the efficiency of logging road transport. Therefore, the view of the road ahead should strongly orient the driver, i.e. be visually clear and clearly changing, ensuring the constancy or smooth reduction of the traffic flow mode. At the same time, the need for a successful spatial solution of the road increases. In the designs of logging roads, straight lines, transition curves, described in recent years most often according to the clothoid, and circular curves are found as elements of the route plan. It is found that the road view in perspective correctly orients the driver of the car, i.e. it is visually clear, provided that the lines describing the edges of the roadway and the edges of the roadway in the perspective image are curved in the same direction as in the road plan. The purpose of the work is to determine a set of quantitative indicators (curvature, radius of the curve in the plan, maximum curvature, maximum rate of change of curvature) for optimization of the visual smoothness and clarity of the central projections of elementary spatial and plane curves. The performed studies allow us to fully characterize the visual smoothness and clarity of the central projections of elementary spatial and plane curves. The above algorithm makes it possible to compile a computer program to determine the mentioned indicators. The indicators determined by this algorithm allow us to evaluate both the visual smoothness and clarity of curves on logging roads.

For citation: Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tyurikova T.V., Tveritnev O.N., Nikitin V.V. Mathematical Modeling of the Route of Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 150–161. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-150-161.

Keywords: spatial curves, route layout, visual clarity, curved section, logging roads.



УДК 674.055, 621.9.025.6

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-162-172

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ КОНТАКТОВ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ
СБОРНОЙ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕЙ ФРЕЗЫ***Н.А. Капустина¹, инж.-конструктор; ResearcherID: [AAK-7733-2021](https://orcid.org/0000-0002-9770-771X),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-771X>**В.И. Малыгин², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [E-6054-2014](https://orcid.org/0000-0003-4268-5178),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4268-5178>**В.И. Мелехов², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>**В.А. Слуцков², аспирант; ResearcherID: [P-7597-2019](https://orcid.org/0000-0003-4032-4635),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4032-4635>*¹ПКБ «Севмаш», Архангельское шоссе, д. 58, г. Северодвинск, Архангельская обл., Россия, 164500; e-mail: n.a.kapustina@inbox.ru²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: vladimir.malygin@yandex.ru

Аннотация. Работоспособность сборного дереворежущего инструмента зависит кроме многих факторов от особенностей конструкции узла крепления режущего элемента. Для выбора сборного дереворежущего инструмента, который соответствовал бы требованиям производства, не существует четких критериев, раскрывающих основные влияющие на стойкость факторы. Моделирование термодинамических процессов в условиях контактного взаимодействия элементов дает возможность выбора конструкции для эффективного применения и повышения стойкости устройства. Цель исследования – моделирование термодинамических процессов в узле крепления режущего элемента в корпусе сборного дереворежущего инструмента для оптимизации его конструктивных и технологических параметров, а также режимов работы. Предметом исследования являются условия контактного взаимодействия и теплообменные процессы между элементами устройства. Сконструирован узел крепления режущего элемента и разработана модель взаимодействия частей механизма сборного дереворежущего инструмента. Дальнейшие задачи: построение модели термодинамических процессов в узле крепления режущего элемента; вывод рекомендации по выбору конструкции сборного дереворежущего инструмента на стадии проектирования – реализованы в работе, продолжающей проводимое исследование. На основе стандартного исполнения дереворежущей цилиндрической насадной фрезы была создана конечно-элементная модель контактного взаимодействия шероховатых волнистых поверхностей частей конструкции. Сделаны выводы о возможности дальнейшего аналитического моделирования контактных условий при имеющихся параметрах. С учетом данных конструирования и полученных показателей сил резания древесины определены сближения контактирующих поверхностей и радиусы единичных площадок касания. Методология и методы включают теоретическое исследование и математическое моделирование, в т. ч. конечно-элементный анализ. Полученные модели могут быть использованы в создании комплексной стойкостной схемы дереворежущего инструмента с учетом других факторов. Основным результатом данного этапа работы является получение модели контактных условий и исходных данных для дальнейшего моделирования

термодинамических процессов в узле крепления ножа в корпусе дереворежущей фрезы для прогнозирования его теплового состояния.

Для цитирования: Капустина Н.А., Малыгин В.И., Мелехов В.И., Слудков В.А. Моделирование дискретных контактов термодинамической системы элементов сборной дереворежущей фрезы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С.162–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-162-172

Ключевые слова: узел крепления, режущий элемент, термодинамические процессы, контактное взаимодействие, сборная дереворежущая фреза, дискретный контакт.

Введение

Отсутствие комплексно обоснованных методик для выбора конструкции сборного инструмента с учетом в первую очередь теплового состояния узла крепления режущего элемента, а также конкретных требований по эффективной эксплуатации инструмента в условиях производства: повышения качества обрабатываемой поверхности и производительности ее работы, совершенствования режимов резания, поддержания стабильности технологических процессов – обосновывает актуальность проводимого исследования. В связи со сложностью постановки тепловой задачи для ее схематизации инструмент для фрезерования древесины рассматривается как малотеплопроводный материал.

На данный момент существует множество конструктивных исполнений узла крепления режущего элемента в корпусе сборной дереворежущей фрезы, при этом основополагающими принципами проектирования являются надежность, удобство крепления, экономичность [3, 11, 13].

Конструктивные особенности узла крепления влияют на теплоотвод, температурные и механические напряжения, износ инструмента [8, 14]. Это определяется термической проводимостью, которая зависит от реальной площади дискретного контакта между элементами конструкции [4, 9, 15, 21]. Вследствие большого числа факторов, оказывающих влияние на теплообразование в режущем клине и теплообмен в зоне контакта режущего элемента и опорной поверхности паза корпуса инструмента, изучаемый вопрос раскрыт недостаточно, на что указывают работы [10, 12].

Целью всего исследования, результаты которого будут отражены в этой и следующей статьях, является определение влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик сборного дереворежущего инструмента на тепловое состояние режущего элемента и теплоотвод, а также вывод рекомендаций для выбора конструкции.

Целью изучения контактных условий стало получение исходных данных для последующего моделирования термодинамических процессов.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования принята конструкция сборной дереворежущей цилиндрической насадной фрезы. Предметом являются контактные условия в узле крепления ножа в ее корпусе. Моделирование термодинамических процессов при определенных контактных условиях даст возможность прогнозировать тепловое состояние режущего элемента и интенсивность теплообмена между частями конструкции.

План исследования отражен в алгоритме (рис. 1) и представляет собой постепенное приближение к созданию и анализу модели термодинамических процессов в узле крепления. Алгоритм имеет обратные связи, поэтому было проведено несколько циклов расчетов для выбора оптимальных конструктивных и технологических параметров, режима работы фрезы.

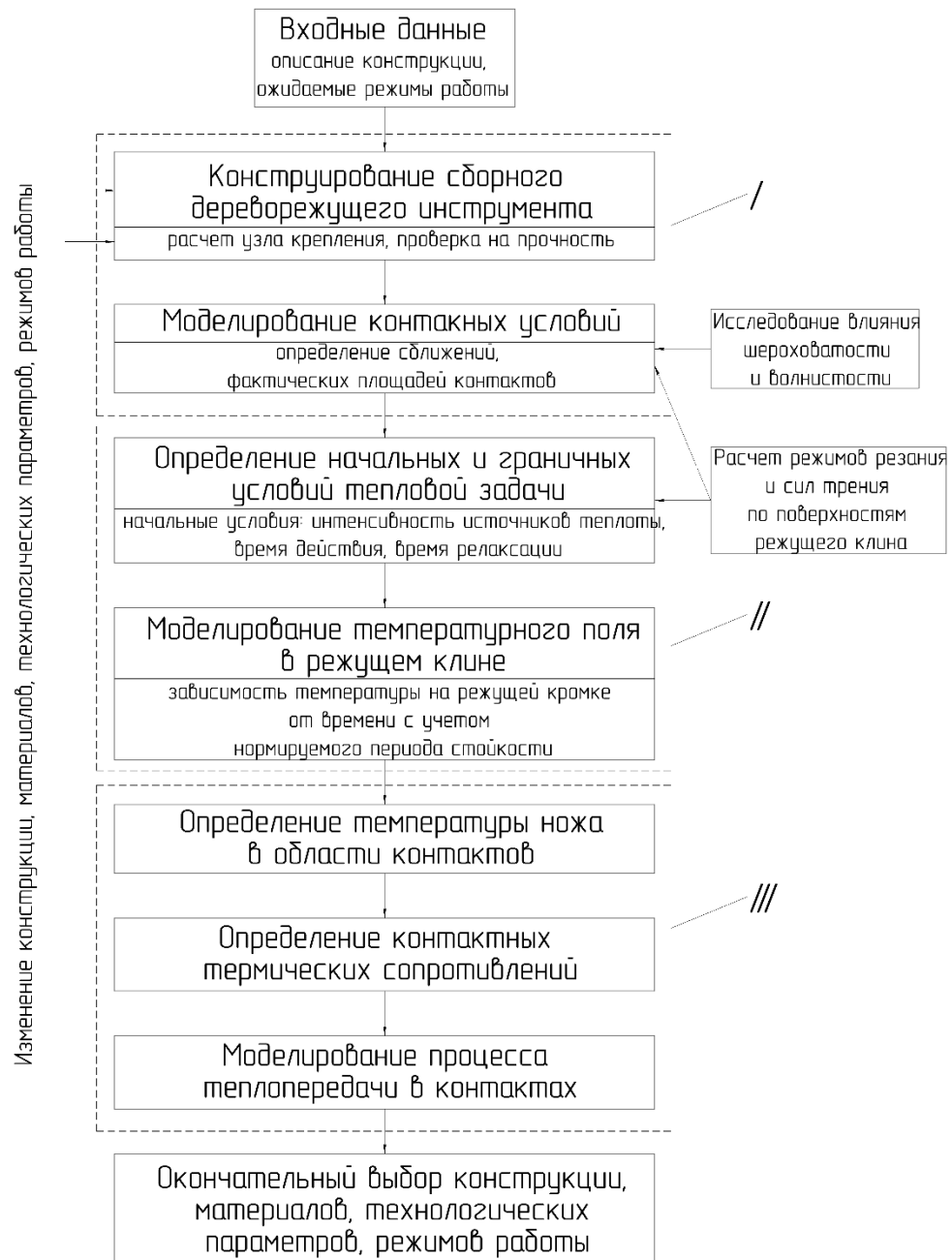


Рис.1. Алгоритм проведения исследования
Fig. 1. Algorithm of the research

Использованы методы математического (аналитического и конечных элементов) моделирования. При нелинейности контактных условий как наилучший вариант выбрано решение на основе программно-числового моделирования процессов. Начальными характеристиками являлись величины, полученные путем аналитического моделирования, и нормируемые параметры шероховатости и волнистости соприкасающихся поверхностей.

Состав программно-технических средств следующий: системы автоматизированного проектирования, использованные для твердотельного моделирования – «Компас-3D», Solidworks, для вычислений – MS Excel, программный комплекс конечно-элементного анализа AnsysWB, позволяющий создавать имитационные модели.

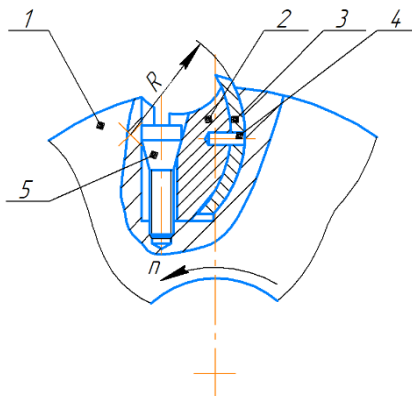
Входными данными для конструирования корпуса фрезы являлись материалы [11]. Цель разработки подобного механизма состояла в уменьшении габаритов существующей конструкции, экономии инструментального материала, повышении технологичности и надежности закрепления ножа, снижении финансовых и временных затрат при подготовке и обслуживании устройства, увеличении производительности механической обработки древесины.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведение I этапа исследования (рис. 1). В процессе конструирования были разработаны узел крепления ножа, корпус фрезы и клин, подобраны радиальные винты и рассчитано их количество, необходимое для надежной фиксации. В вычислениях использованы стандартные методы, применяемые в практике конструирования изделий машиностроения [1]. Устройство узла крепления показано на рис. 2.

Рис. 2. Конструкция узла крепления ножа в корпусе фрезы: 1 – корпус; 2 – клин; 3 – нож; 4 – штифт; 5 – винт

Fig. 2. Design of the knife fastening unit in the milling body: 1 – body; 2 – wedge; 3 – knife; 4 – pin; 5 – screw



Анализ влияния параметров поверхностного слоя на эксплуатационные характеристики корпуса фрезы, такие как фреттинг-коррозия, усталостная прочность, контактная жесткость и плотность соединения, показал, что поверхностный слой детали должен иметь среднежесткий и жесткий опорные профили. Это достигается при обработке поверхностей резанием.

Важным для дальнейшего моделирования контактных условий являлось наличие покрытия: для корпуса фрезы, клина и винтов применяется защитное покрытие по ГОСТ 9.301–86 – химическое оксидирование с промасливанием. Толщина покрытия не нормируется, шероховатость не изменяется.

Антикоррозионные свойства, особенно сопротивление фреттинг-коррозии, что важно при работе сопряженных поверхностей, приобретаются после промасливания.

По результатам конструирования проведена проверка прочности корпуса и клина дереворежущей фрезы под действием испытательных нагрузок (согласно ГОСТ 13932–80) в программном САЕ комплексе AnsysWB.

По завершении I этапа выполнялись все шаги, показанные в алгоритме на рис. 1, вплоть до выявления необходимости вносить коррективы в конструкцию: подбор материалов, технологических параметров и режимов работы режущего инструмента. Так, для рассматриваемого варианта дереворежущей фрезы изменяли количество ножей, способ крепления, материал клина, мощность шпинделя станка, частоту вращения, скорость подачи до достижения оптимального сочетания параметров. Перспективным является рассмотрение модели взаимодействия этих характеристик и раскрытие механизма получения наиболее подходящего варианта, однако это не было изначальной целью проводимой работы и описывается только в качестве результатов.

Окончательные условия эксплуатации и материалы конструкции сборной фрезы следующие: мощность шпинделя станка $N = 7,5–9$ кВт; частота вращения $n = 8000$ мин⁻¹; материал клина – алюминий термоупрочненный В95, ГОСТ Р 51834–2001; материал корпуса – сталь 40Х, ГОСТ 4543–2016; материал ножей – сталь 8Х6НФТ (Х6ВФ), ГОСТ 5950–2000; обрабатываемая поверхность – плоскость (плоское продольное фрезерование); угол заточки – 45°; глубина резания $t = 3$ мм; обрабатываемый материал – береза, влажность $W = 12$ %; ширина фрезерования $b = 60$ мм; число ножей $z = 7$; диаметр $D = 125$ мм (в сборе с ножами); угол резания $\delta = 60^\circ$; время работы $T_{\text{раб}} = 60$ мин; скорость подачи $v_s = 60$ м/мин.

Чертеж корпуса представлен на рис. 3.

Механические характеристики материалов деталей в составе узла крепления в состоянии после термообработки и покрытия, которые являются исходными для моделирования контактных условий, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики материалов деталей в составе узла крепления

Параметр	Нож	Корпус	Клин
Материал	8Х6НФТ	40Х	В95
Твердость HB	545	260	150
Коэффициент Пуассона μ	0,25	0,26	0,34
Модуль упругости, $E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,07	2,14	0,74
Предел текучести σ_T , МПа	1860	720	490

Для моделирования контактных условий проведено исследование влияния шероховатости и волнистости на формирование фактической площади дискретного контакта элементов конструкции дереворежущей фрезы (аналитическим методом и методом конечных элементов) [7]. Целью являлось определение характера деформаций и выбор соответствующих зависимостей для дальнейшего моделирования термодинамических процессов. При описании механических свойств материалов для проведения исследования в программном САЕ комплексе AnsysWB, постановке нелинейной задачи взаимодействия волнистых шероховатых поверхностей, определении режимов резания, которое

включало рассмотрение свойств обрабатываемой древесины, углов резания, кинематических характеристик, использованы данные [17–20]. Для достижения сходимости и устойчивости решений, получаемых в AnsysWB, применены рекомендации [16].

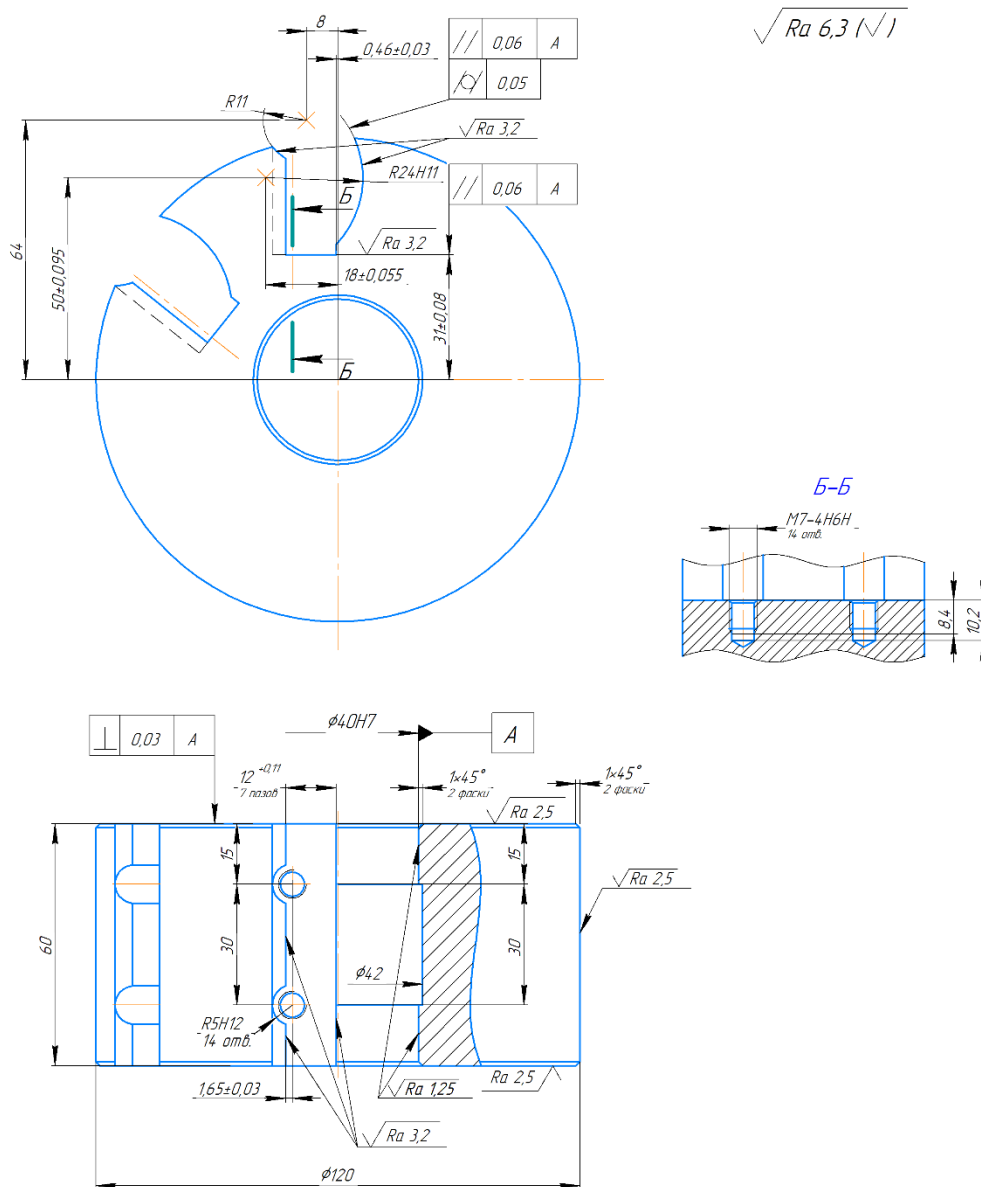


Рис. 3. Чертеж корпуса дереворежущей цилиндрической сборной фрезы

Fig. 3. Drawing of the modular shell-type plane wood-milling cutter body

На основании выводов [7] и исследований Измайлова В.В. [6] при проектировании дереворежущего инструмента были применены аналитические модели без трудоемкого имитационного моделирования. При таком описании контактных взаимодействий достаточно использовать сферическую модель выступов, которая дает удовлетворительные результаты и упрощает расчеты [4].

По данным табл. 1 между твердостью ножа HB_n и клина, ножа HB_n и корпуса HB_k наблюдается значительная разница. На основании этого при математическом описании использовался принцип эквивалентной поверхности: менее твердые описывались как эквивалентно шероховатые, наиболее твердая принималась гладкой.

Нормируемые параметры шероховатости, номинальные площадь контактов и давление на нож для дальнейшего определения сближений и фактических площадей контактов приведены в табл. 2. Номинальное давление рассчитано через усилие прижатия ножа клином и составляющие сил резания, определенные по методике Бершадского А.Л. [2].

Таблица 2

Данные для моделирования контактов поверхностей деталей в составе узла крепления

Параметр	Нож	Корпус	Клин
Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , мкм	2,5	3,2	3,2
Высота сглаживания неровностей R_p , мкм	6,25	8,00	8,00
Средний шаг неровностей S_m , мкм	80		
Номинальная площадь контактирующих поверхностей A_a , мм ²	1340,4		
Номинальное давление на нож p_a , МПа	4,12		

Согласно подходу Демкина Н.Б. [4, 5], относительная площадь контакта гладкой и эквивалентно-шероховатой поверхностей определяется по формуле

$$\eta = \frac{\alpha^{\omega/v} t_m^{\omega/v} p_c}{K_2 B} \quad (1)$$

где α – коэффициент, характеризующий упругую осадку выступов, находится для значений твердости и отношения:

$$\frac{S_m}{R_z} = \frac{80}{10+16} \approx 3,$$

для пары «клин–нож» $\alpha_{кл} = 0,75$, для пары «корпус–нож» $\alpha_k = 0,67$ [4];

t_m – относительная опорная длина на уровне средней линии,

$$t_m = K_t t_{m1} t_{m2};$$

$$K_t = K_1 \frac{(R_{p1} + R_{p2})^{v_1+v_2}}{R_{p1}^{v_1} R_{p2}^{v_2}},$$

при параметрах распределения материала по высоте $v_1 = v_2 = 2$ для фрезерованных поверхностей [4], $K_1 = 0,16$;

$$K_t = 2,64; t_m = 0,66;$$

ω, B – коэффициенты, характеризующие контактные напряжения на выступах, зависящие от формы последних и свойств материала; при упруго-пластическом контакте принимаются как для пластического контакта, а влияние упругой деформации учитывается коэффициентом упругой осадки α ,

$$\omega = 0;$$

$$B = C \sigma_t,$$

C – коэффициент, зависящий от формы выступов поверхности, для сферической модели выступов $C = 2,8-3$ [4], в расчете принято $C = 3$;

p_c – контурное давление, МПа; поскольку в данном случае волнистость не оказывает влияние на фактическую площадь контакта, контурное давление равно номинальному [7]:

$$p_c = p_a;$$

K_2 – коэффициент, определяемый относительно характеристик опорной кривой; для пластического контакта при $\omega = 0$; $K_2 = 1$ [4].

В итоге преобразования формулы (1) получаем относительную площадь контакта:

$$\eta = \frac{p_a}{3\sigma_\tau}. \quad (2)$$

Сближение поверхностей под действием нагрузки рассчитывается по [4]:

$$\Delta = R_p \left(\frac{p_a}{\alpha K_2 t_m B} \right)^{\frac{1}{\nu + \omega}}. \quad (3)$$

После преобразования получаем выражение для определения сближения поверхностей с учетом имеющихся данных:

$$\Delta = R_p \left(\frac{p_a}{3\alpha t_m \sigma_\tau} \right)^{\frac{1}{\nu}}. \quad (4)$$

Радиус контактного пятна находится по [4]:

$$r = \sqrt{2\alpha R_m \Delta}, \quad (5)$$

где R_m – радиус скругления вершин неровностей эквивалентной поверхности, мкм,

$$R_m = 0,22 t_m \frac{S_m^2}{R_a}.$$

Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета параметров контактов

Параметр	Контакт «клин–нож»	Контакт «корпус–нож»
Относительная фактическая площадь контакта η_i	0,00280	0,00191
Сближение поверхностей Δ_i , мкм	3,91	3,65
Радиус контактного пятна r_i , мкм	30,92	28,24

Полученные в результате расчетов характеристики контактов поверхностей в парах «клин–нож» и «нож–корпус» в совокупности с данными табл. 1 иллюстрируют природу дискретного контакта инженерных поверхностей. Относительная фактическая площадь контакта твердой условно гладкой поверхности ножа с менее твердой эквивалентно-шероховатой поверхностью клина больше относительной фактической площади контакта с поверхностью корпуса пропорционально отношению пределов текучести материалов корпуса и клина при равных усилиях прижатия. Для сферических моделей с учетом величины деформации выступов менее твердого материала клина в сравнении с материалом корпуса (по коэффициенту упругой осадки) при прочих равных условиях наблюдается большее сближение поверхностей и, как следствие, больший радиус контактного пятна.

Заключение

Проведенное ранее исследование влияния шероховатости и волнистости на фактическую площадь дискретного контакта элементов конструкции

дереворезающей фрезы позволило перейти к сферической модели выступов и применить аналитические методы при моделировании контактов. В работе получены их характеристики: относительная фактическая площадь, сближение поверхностей, радиус контактного пятна. Данные – результаты исследования – являются входными для определения термодинамических характеристик в процессе фрезерования древесины. Модели контактов дают возможность применения электротепловой аналогии для дальнейших теоретических разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.
Anur'yev V.I. *Handbook for Mechanical Design Engineer*. In 3 vol. Vol. 1. Ed. by I.N. Zhestkova. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 920 p.
2. *Бершадский А.Л., Цветкова Н.И.* Резание древесины. Минск: Вышейш. шк., 1975. 302 с.
Bershadskiy A.L., Tsvetkova N.I. *Wood-Cutting Process*. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1975. 302 p.
3. *Глебов И.Т., Неустроев Д.В.* Справочник по дереворезающему инструменту. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. акад., 2000. 253 с.
Glebov I.T., Neustroyev D.V. *Handbook of Wood-Cutting Tool*. Yekaterinburg, UGLTA Publ., 2000. 253 p.
4. *Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.* Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
Demkin N.B., Ryzhov E.V. *Surface Quality and Contact of Machine Parts*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 244 p.
5. *Демкин Н.Б., Удалов С.В., Алексеев В.А., Измайлов В.В., Болотов А.Н.* Контакт шероховатых волнистых поверхностей с учетом взаимного влияния неровностей // Трение и износ. 2008. Т. 29, № 3. С. 231–237.
Demkin N.B., Udalov S.V., Alekseev V.A., Izmaylov V.V., Bolotov A.N. Contact of Rough Wavy Surfaces with Consideration of Mutual Effect of Asperities. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2008, vol. 29, no. 3, pp. 231–237. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366608030045>
6. *Измайлов В.В., Чаплыгин С.А.* Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин // Интернет-журн. «Наукоедение». 2014. № 6(25).
Izmailov V.V., Chaplygin S.A. Numerical and Analytical Simulation of Machine Parts Discrete Contact. *Naukovedenie*, 2014, no. 6(25). DOI: <https://doi.org/10.15862/10TVN614>
7. *Капустина Н.А.* Определение контактных условий для моделирования термодинамических процессов в узле крепления ножа в корпусе фрезы // XLVII Ломоносовские чтения: сб. материалов региональной науч.-практ. конф. Архангельск: ИД САФУ, 2019. С. 128–133.
Kapustina N.A. Determination of Contact Conditions for Modeling of Thermodynamic Processes in the Knife Fastening Unit in the Milling Body. *XLVII Lomonosov Readings: Proceedings of the Regional Scientific and Practical Conference*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2019, pp. 128–133.
8. *Малыгин В.И.* Повышение эффективности режущих инструментов методами сложного неоднородного моделирования и неразрушающей активной экспресс-диагностики: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1995. 346 с.
Malygin V.I. *Improving the Efficiency of Cutting Tools by the Methods of Complex Heterogeneous Modeling and Non-Destructive Active Express Diagnostics*: Dr. Eng. Sci. Diss. Moscow, 1995. 346 p.
9. *Малыгин В.И., Ануфриева А.Р.* Исследование влияния характеристик стыка на термосопротивление сборного инструмента // Научно-техн. сб. Архангельск, 1990. С. 64–70.

Malygin V.I., Anufriyeva A.R. Research of the Influence of Joint Characteristics on the Thermal Resistance of a Modular Cutting Tool. *Research and Technical Source Book*. Arkhangelsk, 1990, pp. 64–70.

10. Малыгин В.И., Лобанов Н.В., Кремлева Л.В. Методы оптимизации и оценка качества дереворежущих фрез при стендовом и математическом моделировании. 1. Алгоритм решения задачи оптимизации конструкции сборного инструмента при физическом и математическом моделировании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 61–71.

Malygin V.I., Lobanov N.V., Kremleva L.V. Methods of Optimization and Quality Rating of Wood Cutters under Bench and Mathematical Simulation. 1. Algorithm of Problem Solution on Optimization of Assembled Tool Structure under Physical and Mathematical Modeling. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2008, no. 2, pp. 61–71. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/810/81025e18e6677908380022096514573c.pdf>

11. Малыгин В.И., Кремлева Л.В., Лобанов Н.В., Мелехов В.И. Эволюция топологии сборных дереворежущих фрез // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 6. С. 73–85.

Malygin V.I., Kremleva L.V., Lobanov N.V., Melekhov V.I. Evolution of the Topological Structure of Wood-Milling Cutters. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 6, pp. 73–85. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b29/mod_8_6_2013.pdf

12. Малышев В.И., Резников Л.А. Теплофизические аспекты процесса резания в трудах отечественных и американских ученых // Сб. науч. тр. SWorld. 2012. Т. 12, № 3. С. 73–80.

Malyshev V.I., Reznikov L.A. Thermophysical Aspects of Metal Cutting Process in Works of Russian and American Scientists. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2012, vol. 12, no. 3, pp. 73–80.

13. Морозов В.Г. Дереворежущий инструмент: справочник. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 339 с.

Morozov V.G. *Wood-Cutting Tool: Handbook*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 339 p.

14. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

Reznikov A.N. *Thermophysics of Mechanical Processing*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 279 p.

15. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.

Shlykov Yu.P., Ganin E.A., Tsarevskiy S.N. *Contact Thermal Resistance*. Moscow, Energiya Publ., 1977. 328 p.

16. Barrett P.R. *ANSYS Nonlinear Convergence Best Practices*. CAE Associates, 2012. 75 p.

17. Gao Y.-F., Bower A.F. Rough Surface Plasticity and Adhesion across Length Scales. *Nanomechanics of Materials and Structures*, 2006, pp. 277–287. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-3951-4_27

18. Jackson R.L., Green I. On the Modeling of Elastic Contact between Rough Surfaces. *Tribology Transactions*, 2011, vol. 54, iss. 2, pp. 300–314. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2010.542277>

19. Marohnić T., Basan R., Franulović M. Evaluation of Methods for Estimation of Cyclic Stress-Strain Parameters from Monotonic Properties of Steels. *Metals*, 2017, vol. 7, iss. 1, art. 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.02.029>

20. McKenzie W.M. *Fundamental Analysis of the Wood-Cutting Process*. Doctoral Thesis. Ann Arbor, University of Michigan, 1961. 151 p.

21. Rachid Ch., Lebon Fr., Rosu I., Mohammed M. Numerical Study of the Surface Roughness, Thermal Conductivity of the Contact Materials and Interstitial Fluid Convection Coefficient Effect on the Thermal Contact Conductance. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 265–271. DOI: <https://doi.org/10.18280/acsm.430410>

**MODELING OF DISCRETE CONTACTS
FOR THE THERMODYNAMIC ELEMENT SYSTEM
OF A MODULAR WOOD-MILLING CUTTER**

*Natalia A. Kapustina*¹, Design Engineer; ResearcherID: [AAK-7733-2021](https://orcid.org/0000-0002-9770-771X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-771X>

*Vladimir I. Malygin*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [E-6054-2014](https://orcid.org/0000-0003-4268-5178),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4268-5178>

*Vladimir I. Melekhov*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

*Vladimir A. Slutskov*², Postgraduate Student; ResearcherID: [P-7597-2019](https://orcid.org/0000-0003-4032-4635),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4032-4635>

¹Design Bureau “Sevmash”, Arkhangel’skoye shosse, 58, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164500, Russian Federation; e-mail: n.a.kapustina@inbox.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: vladimir.malygin@yandex.ru

Abstract. Operational capability of a modular wood-cutting tool depends, besides many factors, on the design features of cutting element fastening unit. There are no clear and precise methods that explain major factors influencing tool durability for selecting the design of the modular wood-cutting tool, which would meet production requirements. Thermodynamics modeling under contact interaction of elements enables to choose a design for effective application and increases the tool efficient life. The research purpose is modeling of thermodynamic processes in the cutter element fastening unit in the wood-cutting tool body in order to optimize the design, technological parameters and operating modes of the tool. The research subject is the contact interaction conditions and heat transfer processes between the device elements. The cutting element fastening unit is designed and the model of interaction between the parts of the mechanism of the modular wood-milling tool is developed. Further tasks, namely, development of a model of thermodynamic processes in the cutting element fastening unit, discussion of the results and identifying the recommendations for choosing the design of the modular wood-cutting tool at the design stage were realized in a work that continues the ongoing research. The finite-element model of rough wavy surfaces contact interaction of design elements was developed on the basis of standard design of a shell-type plain wood-milling cutter. The analysis concluded that further analytical modeling of contact conditions with existing parameters is possible. The contacting surfaces approach and the radii of single contact areas were determined taking into account the data of design and calculation of wood cutting forces. These results will be used next in modeling of thermodynamic processes. Methodology and research methods comprise theoretical study and mathematical modeling, including finite-element analysis. The models developed are possible to be used in the creation of a complex durability model of the wood-cutting tool with regard to other factors. The main result of this research stage is obtaining the model of contact conditions and initial data for further modeling of thermodynamic processes in the knife fastening unit in the milling body to predict its thermal condition.

For citation: Kapustina N.A., Malygin V.I., Melekhov V.I., Slutskov V.A. Modeling of Discrete Contacts for the Thermodynamic Element System of a Modular Wood-Milling Cutter. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 162–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-162-172.

Keywords: fastening unit, cutting element, thermodynamic processes, contact interaction, modular wood-milling cutter, discrete contact.



УДК 547.596.092.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-173-180

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОДУКТА
ЖИДКОФАЗНОГО ОКИСЛЕНИЯ α -ПИНЕНА КИСЛОРОДОМ
ВОЗДУХА В ПРИСУТСТВИИ СТЕАРАТА КОБАЛЬТА (II)***А.А. Сосновская, аспирант; ResearcherID: [AAK-1321-2021](https://orcid.org/0000-0001-7556-2284),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7556-2284>**В.Л. Флейшер, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAM-6580-2021](https://orcid.org/0000-0003-2997-7707),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2997-7707>*

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13 а, Минск, Республика Беларусь, 220006; e-mail: v_fleisher@list.ru, a.sosnovskaya94@gmail.com

Аннотация. Один из возможных вариантов жидкофазного окисления кислородом воздуха α -пинена приводит к образованию смеси терпеновых кислородсодержащих соединений (эпоксиды, спирты, кетоны и др.). Проблема здесь заключается в образовании большого количества 2-3-эпоксипинена, который с течением времени в результате гидролиза превращается в *транс*-соберерол, камфоленовый альдегид, *транс*-пинокарвеол, *транс*-карвеол, *транс*-3-пинен-2-ол. Первый из них имеет твердую кристаллическую структуру. Соберерол широко используется в парфюмерии при получении синтетических душистых веществ, в фармацевтической промышленности, в частности входит в составы лекарственных средств, обладающих муколитическим действием, а также применяется при лечении головных болей и таких заболеваний, как ринорея и хронический бронхит. Целью работы является идентификация кристаллического продукта, полученного жидкофазным окислением α -пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II). Процесс жидкофазного окисления проводили при следующих параметрах: температура – 70 °С, расход воздуха – 16,67 см³/с, продолжительность – 5 ч, количество катализатора – 0,2...0,5 %. Далее смесь подвергали паровой дистилляции для отделения мономеров (в их состав входят терпеновые кислородсодержащие соединения и углеводороды) от полимеров. В результате отстаивания и хранения смеси были обнаружены и выделены из маточного раствора кристаллы. Их идентификацию осуществляли с помощью ИК- и ЯМР ¹³С-спектроскопий, а также сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что пространственная организация выделенных кристаллов и стандартного образца (Sigma Aldrich) представлена многослойными прямоугольными пластинками. Анализ ИК-спектров кристаллов показал, что полоса поглощения при волновом числе 3318 см⁻¹ соответствует внутри- и межмолекулярным водородным связям в гидроксильных группах, при волновых числах 2887, 2935, 2975 см⁻¹ – метиленовым группам. Такие данные сопоставимы с результатами ИК-спектров стандартного образца. С учетом предыдущих исследований ЯМР ¹H- [15] и ЯМР ¹³С- спектра установлено, что полученный кристаллический продукт жидкофазного окисления α -пинена является *транс*-собереролом. **Для цитирования:** Сосновская А.А., Флейшер В.Л. Идентификация кристаллического продукта жидкофазного окисления α -пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 173–180. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-173-180

Ключевые слова: α -пинен, *транс*-соберерол, вербенон, вербенон, жидкофазное окисление, стеарат кобальта, эпоксид α -пинена.

Введение

Процесс жидкофазного окисления кислородом воздуха терпеновых углеводородов хорошо изучен [2–11, 15–24], однако сложно воспроизводим, т. к. окисление углеводородов относится к радикально-цепному и реакция может протекать в нескольких направлениях с образованием различных кислородсодержащих соединений. В настоящее время существует общепринятая схема радикально-цепного некаталитического окисления углеводородов [6, 7, 16, 17]: сначала происходит зарождение цепи (стадия инициирования), далее продолжение процесса образования цепи с вырожденным разветвлением и обрыв цепи.

В реакциях некаталитического окисления углеводородов основным источником радикалов является термический распад гидроперекисей, что увеличивает продолжительность реакции и приводит к образованию большого количества полимерных соединений. Использование в качестве катализаторов солей металлов переменной валентности (например, солей кобальта, никеля, марганца и др.) обуславливает облегчение протекания реакции окисления за счет образования комплекса ионов металла с кислородом, сокращение индукционного периода и увеличение степени превращения исходного субстрата в кислородсодержащие продукты. Однако открытым остается вопрос о выборе наиболее эффективного катализатора либо каталитической системы, обеспечивающих высокий выход конечных продуктов реакции [7, 15, 17].

Одним из направлений жидкофазного окисления углеводородов кислородом воздуха является образование высококипящих полимерных соединений; другим – эпоксидование α -пинена с образованием эпоксида, который выступает в качестве реакционноспособного соединения за счет углового напряжения оксиранового цикла и может подвергаться дальнейшим реакциям и перегруппировкам.

Основными продуктами жидкофазного окисления α -пинена (1) с участием катализаторов на основе металлов переменной валентности являются эпоксид α -пинена (2), вербенон (3) и вербенон (4) (рис. 1). В условиях жидкофазного окисления кроме основной реакции идет гидролиз эпоксида α -пинена, в результате образуются камфоленовый альдегид (5), *транс*-пинокарвеол (6), *транс*-карвеол (7), кристаллический *транс*-соберерол (8) и *транс*-3-пинен-2-ол (9) [4, 23].

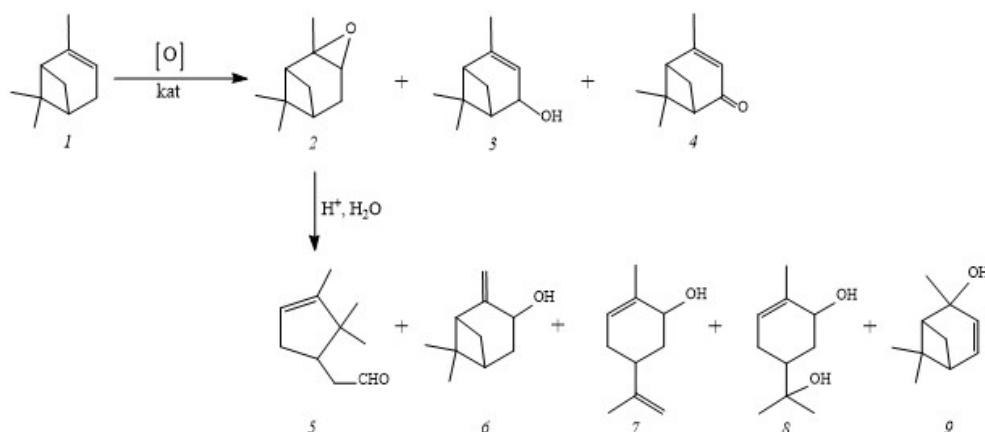


Рис. 1. Терпеновые кислородсодержащие соединения из α -пинена и его эпоксида

Fig. 1. Terpene oxygen-containing compounds from α -pinene and its epoxide

Ранее нами был изучен процесс жидкофазного окисления α -пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II), в результате чего были установлены основные зависимости, и на их основе подобраны условия реакции [12, 14].

Цель исследования – идентификация кристаллического продукта, полученного жидкофазным окислением α -пинена кислородом воздуха в присутствии катализатора стеарата кобальта (II).

Объекты и методы исследования

Для эксперимента использовали 50 мл α -пинена (98 %, согласно газожидкостной хроматографии), полученного из живичного скипидара методом вакуумной ректификации. В качестве катализатора применяли стеарат кобальта (II), выделенный в результате обменной реакции между хлоридом кобальта и стеаратом натрия.

Стандартный образец *транс*-соберол (99 %, Sigma Aldrich) и выделенный из маточного раствора исследуемый образец кристаллов были проанализированы методом ИК-спектроскопии на ИК-микроскопе IN10 Nicolet (США, Thermo Scientific) с приставкой НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) с кристаллом Ge, разрешение – 8 см^{-1} при 64-кратном сканировании в диапазоне частот $675\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$. Снимки микроструктур кристаллических соединений получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония).

Спектры ЯМР ^{13}C регистрировали на спектрометре AVANCE-500 фирмы Bruker-Biospin (Германия) (рабочая частота – 500,13 МГц). Концентрация растворов составляла 2...5 % в CDCl_3 , химические сдвиги определяли относительно внутреннего стандарта тетраметилсилана.

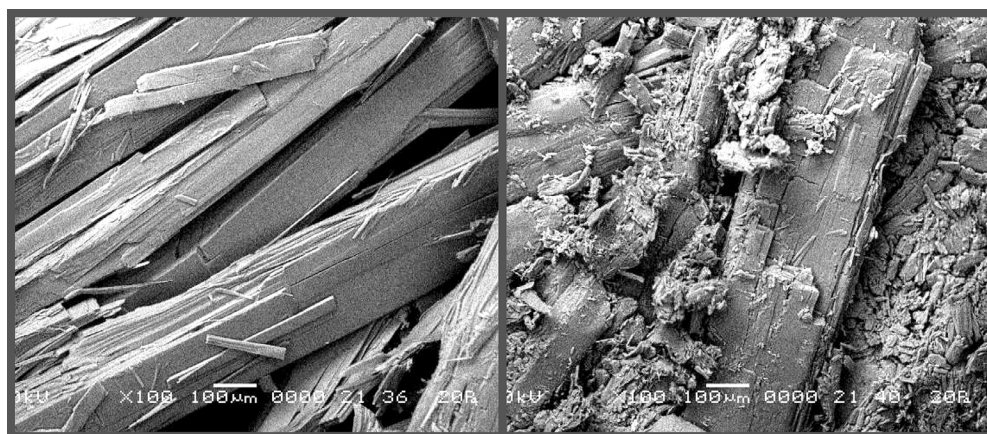
Процесс жидкофазного окисления α -пинена осуществляли в стеклянном реакторе, оснащённом барботажным устройством для подачи воздуха, термометром и обратным холодильником. Для улавливания легколетучих компонентов реакционной смеси применяли каплеотбойник. Нагрев проводили с использованием масляной бани, снабжённой контактным термометром с автоматическим терморегулятором. Процесс окисления выполняли при оптимизированных параметрах [14]: температура – $70 \text{ }^\circ\text{C}$, расход воздуха – $16,67 \text{ см}^3/\text{с}$, продолжительность – 5 ч, масса катализатора – 0,2...0,5 %. Полученный оксидат нейтрализовали 10 %-м водным раствором гидроксида натрия в соотношении 1,0:0,5 (оксидат:щелочь соответственно). Далее смесь подвергали паровой дистилляции в течение 2...3 ч. При хранении образовавшиеся в мономерах кристаллы были выделены из маточного раствора. Установление структуры кристаллов осуществляли методом ИК-, ЯМР ^{13}C -спектроскопий и сканирующей электронной микроскопии.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученный в результате процесса жидкофазного окисления α -пинена оксидат подвергали паровой дистилляции с целью отделения мономеров от полимерных соединений. При хранении в растворе мономеров образовались белые кристаллы, предположительно, *транс*-соберола. Ранее нами изучена их

структура и структура стандартного образца (Sigma Aldrich) методами рентгенофазового анализа, ЯМР ^1H -спектроскопии и микроскопии с увеличением в 200 и 400 раз [13].

С помощью сканирующей электронной микроскопии удалось рассмотреть форму и пространственную организацию кристаллических соединений. Стандартный образец (*транс*-собрерол) был в измельченном состоянии, а изучаемый кристаллический продукт был выделен из маточного раствора, однако на рис. 2 отчетливо видно, что их структуры схожи и представлены многослойными прямоугольными пластинками.



a

б

Рис. 2. Микроструктуры кристаллических продуктов: *a* – исследуемый образец; *б* – стандартный образец (*транс*-собрерол)

Fig. 2. Microstructures of crystalline products: *a* – test sample; *б* – standard sample (*trans*-sobrerol)

Полосы поглощения на ИК-спектре в области 2973, 2934, 2886 cm^{-1} соответствуют валентным колебаниям метиленовых групп. При волновых числах 3318 cm^{-1} идентифицирована полоса, соответствующая внутри- и межмолекулярным водородным связям, что можно объяснить склонностью гидроксильных групп к образованию различных ассоциатов с помощью водородных связей. Это сильно отражается на полосах поглощения гидроксильных групп: полосы валентных колебаний ОН-групп смещаются в область более низких частот в сравнении со свободными гидроксильными группами, имеющими волновые числа 3670–3580 cm^{-1} . Чем больше смещение, тем прочнее водородная связь. Полученные результаты сопоставимы с результатами ИК-спектров стандартного образца.

Структура исходного кристаллического продукта была установлена ранее с помощью ЯМР ^1H [13]. Дополнением к предыдущим исследованиям являлось изучение спектра ЯМР ^{13}C путем сравнения экспериментальных значений химических сдвигов исходных кристаллов и стандартного образца, а также сопоставление полученных результатов с литературными данными.

Транс-собрерол [*n*-мент-1-ен-6,8-диол]: ЯМР ^{13}C -спектр, CDCl_3 , δ , м.д.: 26,20 (C9); 27,27 (C8); 27,81 (C4); 32,69 (C6); 38,89 (C5); 68,67 (C1); 72,33 (C7);

125,34 (C3); 134,48 (C2). Значения соответствуют опубликованным [1, 19]. ИК-спектр, ν , cm^{-1} : 3318 [(O–H, H)], 2840, 2886, 2934, 2973 (CH). Значения совпадают с данными, представленными в [1].

Заключение

В результате исследований структуры кристаллического продукта, полученного жидкофазным окислением α -пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II), с учетом результатов предыдущих исследований установлено:

структуры исследуемого образца кристаллов и стандартного представлены многослойными прямоугольными пластинками;

зафиксированы валентные колебания, соответствующие при волновых числах 3318 cm^{-1} внутри- и межмолекулярным водородным связям гидроксильных групп и при 2973, 2934, 2886, 2840 cm^{-1} – маятниковым колебаниям метиленовых групп;

экспериментальные значения химических сдвигов при атомах C³ (δ 125,34 м.д.) и C⁵ (δ 38,89 м.д.) в спектре ЯМР ¹³C сопоставимы со значениями сдвигов стандартного образца и похожи (как показывают полученные ранее экспериментальные значения сдвигов на спектре ЯМР ¹H и константа спин-спинового взаимодействия – δ 4,08 м.д., ³J = 2,2+2,8 Гц) на *транс*-соберол.

Таким образом, описана структура кристаллического продукта, выделенного в результате жидкофазного окисления α -пинена кислородом воздуха с использованием в качестве катализатора стеарата кобальта (II), соответствующая *транс*-соберолу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев И.Н., Ипатова Е.У., Фролова Л.Л. Атлас ЯМР и ИК спектров монотерпеноидов. Молдова: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 380 с.

Alekseev I.N., Ipatova E.U., Frolova L.L. *Monoterpenoids NMR and IR Spectra Atlas*. Moldova, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 380 p.

2. Бухаркина Т.В., Вержичинская С.В., Гречишкина О.С., Караджев М.А. Подготовка этилбензола к воспроизводимому эксперименту по его жидкофазному окислению молекулярным кислородом в присутствии стеарата кобальта // Успехи в химии и хим. технологии. 2016. Т. 30, № 11. С. 41–43.

Bukharkina T.V., Verzhichinskaya S.V., Grechishkina O.S., Karadzhev M.A. Preparation of Ethylbenzene for Reproducible Experiment on Its Liquid-Phase Oxidation by Molecular Oxygen in Presence of Cobalt Stearate. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2016, vol. 30, no. 11, pp. 41–43.

3. Вержичинская С.В., Малинkin Д.А., Шарипов А.А. Индукционный период жидкофазного окисления этилбензола кислородом в присутствии стеарата кобальта. Схема превращений реагентов // Успехи в химии и хим. технологии. 2014. Т. 28, № 10. С. 35–38.

Verzhichinskaya S.V., Malinkin D.A., Scharipov D.A. Scheme of Transformations in Induction Period of Liquid Phase Oxidation of Ethylbenzene by Atmospheric Oxygen in the Presence of Cobalt Stearate. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2014, vol. 28, no. 10, pp. 35–38.

4. Ильина И.И., Максимчук Н.В., Семиколенов В.А. Каталитический синтез душистых веществ из растительных монотерпенов // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева). 2004. Т. XLVIII, № 3. С. 38–53.

Ilyina I.I., Maksimchuk N.V., Semikolenov V.A. Catalytic Synthesis of Aromatic Substances from Plant Monoterpenes. *Rossijskij himicheskij zhurnal* [Russian Journal of General Chemistry], 2004, vol. XLVIII, no. 3, pp. 38–53.

5. Кислицын А.Н., Клабукова И.Н., Косюкова Л.В., Трофимов А.Н. Исследование процесса жидкофазного инициированного окисления α -пинена кислородом воздуха. Сообщение 1 // Химия растит. сырья. 2003. № 1. С. 53–59.

Kislitsin A.N., Klabukova I.N., Kosyukova L.V., Trofimov A.N. Investigation of the Process of Liquid-Phase Initiated Oxidation of α -Pinene by Atmospheric Oxygen. Message 1. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2003, no. 1, pp. 53–59.

6. Кислицын А.Н., Клабукова И.Н., Трофимов А.Н. Исследование процесса жидкофазного инициированного окисления α -пинена кислородом воздуха. Сообщение 2 // Химия растит. сырья. 2003. № 4. С. 31–36.

Kislitsin A.N., Klabukova I.N., Trofimov A.N. Investigation of the Process of Liquid-Phase Initiated Oxidation of α -Pinene by Atmospheric Oxygen. Message 2. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2003, no. 4, pp. 31–36.

7. Кислицын А.Н., Клабукова И.Н., Трофимов А.Н. О химизме жидкофазного окисления α -пинена кислородом воздуха // Химия растит. сырья. 2004. № 3. С. 109–116.

Kislitsin A.N., Klabukova I.N., Trofimov A.N. On the Chemistry of Liquid-Phase Oxidation of α -Pinene by Atmospheric Oxygen. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2004, no. 3, pp. 109–116.

8. Меньшиков С.Ю., Мишина Ю.В., Микушина Ю.В., Остроушко А.А. Сравнительное изучение аэробного окисления скипидара // Журн. прикладной химии. 2008. Т. 81, вып. 1. С. 56–58.

Men'shikov S.Yu., Mishina Yu.V., Mikushina Yu.V., Ostroushko A.A. A Comparative Study of Aerobic Oxidation of Turpentine. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2008, vol. 81, iss. 1, pp. 56–58. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427208010126>

9. Патласов В.П., Савиных В.И., Кушниц С.Р., Лукоянов В.П. Исследование непрерывного процесса окисления α -пинена // Изв. вузов. Лесн. журн. 1999. № 5. С. 75–81.

Patlasov V.P., Savinykh, V.I. Kushnir S.R. Lukoyanov V.P. Investigation of the Continuous Process of Oxidation of α -Pinene. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1999, no. 5, pp. 75–81.

10. Перкель А.Л., Воронина С.Г., Бунеева Е.И., Непомнящих Ю.В., Носачёва И.М. Пероксидные предшественники деструкции углеродной цепи в процессах жидкофазного окисления насыщенных соединений на стадиях, следующих за образованием спирта и кетона // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2003. № 5. С. 92–103.

Perkel' A.L., Voronina S.G., Buneyeva V.V., Nepomnyashchikh I.M., Nosacheva I.M. Peroxide Precursors of Carbon Chain Degradation in the Processes of Liquid-Phase Oxidation of Saturated Compounds at the Stages Following the Formation of Alcohol and Ketone. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2003, no. 5, pp. 92–103.

11. Рахимов А.И. Химия и технология органических перекисных соединений. М.: Химия, 1979. 392 с.

Rakhimov A.I. *Chemistry and Technology of Organic Peroxide Compounds*. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 392 p.

12. Сосновская А.А., Флейшер В.Л. Система $\text{Co}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ как катализатор жидкофазного окисления α -пинена // Технология органических веществ: материалы 83-й науч.-техн. конф. Минск: БГТУ, 2019. С. 18.

Sosnovskaya A.A., Fleisher V.L. The $\text{Co}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ System as a Catalyst for the Liquid-Phase Oxidation of α -Pinene. *Technology of Organic Substances: Proceedings of the 83rd Scientific and Technical Conference*. Minsk, BSTU Publ., 2019, p. 18.

13. Сосновская А.А., Флейшер В.Л. Исследование структуры кристаллического продукта реакции жидкофазного окисления альфа-пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II) методами рентгеноструктурного анализа, ИК- и ЯМР-спектроскопии // Технология органических веществ: материалы 84-й науч.-техн. конф. Минск: БГТУ, 2020. С. 30–32.

Sosnovskaya A.A., Fleisher V.L. Investigation of the Structure of Crystalline Product of Liquid-Phase Oxidation of α -Pinene by Atmospheric Oxygen in the Presence of Cobalt (II) Stearate X-Ray Diffraction Analysis, IR- and NMR-Spectroscopy. *Technology of Organic Substances: Proceedings of the 84rd Scientific and Technical Conference*. Minsk, BSTU Publ., 2020, pp. 30–32.

14. Сосновская А.А., Флейшер В.Л., Боркина Я.В. Оптимизация процесса жидкофазного окисления α -пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II) // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. 2019. Т. 55, № 2. С. 233–239.

Sosnovskaya A.A., Fleisher V.L., Borkina Y.V. Optimization of Liquid-Phase α -Pinene Oxidation with Oxygen in Presence of Cobalt (II) Stearate. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series], 2019, vol. 55, no. 2, pp. 233–239. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-233-239>

15. Хавкинс Э.Дж.Э. Органические перекиси, их получение и реакции. М.; Л.: Химия, 1964. 536 с.

Hawkins E.G.E. *Organic Peroxides: Their Formation and Reactions*. Trans. from English. Moscow, Khimiya Publ., 1964. 536 p.

16. Эмануэль Н.М., Денисов Е.Т., Майзус З.К. Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе. М.: Наука, 1965. 375 с.

Emanuel' N.M., Denisov E.T., Mayzus Z.K. *Chain Reactions of Oxidation of Hydrocarbons in the Liquid Phase*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 375 p.

17. Эмануэль Н.М., Заиков Г.Е., Майзус З.К. Роль среды в радикально-цепных реакциях окисления органических соединений. М.: Наука, 1973. 278 с.

Emanuel' N.M., Zaikov G.E., Mayzus Z.K. *The Role of the Medium in Radical Chain Reactions of Oxidation of Organic Compounds*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 278 p.

18. Allal B.A., Firdoussi L.E., Allaoud S., Katim A., Castanet Y., Mortreux A. Catalytic Oxidation of α -Pinene by Transition Metal Using *t*-Butyl Hydroperoxide and Hydrogen Peroxide. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2003, vol. 200, iss. 1-2, pp. 177–184. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1381-1169\(03\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S1381-1169(03)00038-4)

19. Becerra J.-A., Villa A.-L. Thermodynamic Analysis of α -Pinene and Limonene Allylic Oxidation over a $\text{FePcCl}_{16}\text{-NH}_2\text{-SiO}_2$ Catalyst. *Chemical Engineering & Technology*, 2018, vol. 41, iss. 1, pp. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201700118>

20. Durbetaki A.J., Linder S.M. *Preparation of Sobrerol*. Patent US, no. 2949489, 1960.

21. Lajumen M.K., Maunula T., Koskinen A.M.P. Co(II) Catalysed Oxidation of α -Pinene by Molecular Oxygen. Part 2. *Tetrahedron*, 2000, vol. 56, iss. 41, pp. 8167–8171. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(00\)00742-0](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(00)00742-0)

22. Naróg D., Szczepani A., Sobkowiak A. Iron(II, III)-Catalyzed Oxidation of Limonene by Dioxigen. *Catalysis Letters*, 2008, vol. 120, iss. 3-4, pp. 320–325. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10562-007-9290-7>

23. Oliveira P., Rojas-Cervantes M.L., Ramos A.M., Fonseca I.M., Botelho do Rego A.M., Vital J. Limonene Oxidation over $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ Catalysts. *Catalysis Today*, 2006, vol. 118, iss. 3-4, pp. 307–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.07.032>

24. Sun Kw.K., Jeongi Ch., Sup P.S., Gun Ch.S., Soo Kw.S., Kwang-Pyo L., Min L.S. *Composition for Preventing or Treating Muscle Weakness Related Diseases Comprising Sobrerol*. Patent WO, no. WO 2017043935 A1, 2017.

IDENTIFICATION OF THE CRYSTALLINE PRODUCT OF LIQUID-PHASE OXIDATION OF α -PINENE WITH ATMOSPHERIC OXYGEN IN THE PRESENCE OF COBALT (II) STEARATE

Alexandra A. Sosnovskaya, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAK-1321-2021](https://orcid.org/0000-0001-7556-2284),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7556-2284>

Viachaslau L. Fleisher, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAM-6580-2021](https://orcid.org/0000-0003-2997-7707), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2997-7707>

Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; e-mail: a.sosnovskaya94@gmail.com, v_fleisher@list.ru

Abstract. One of the possible directions of liquid-phase oxidation of α -pinene by atmospheric oxygen leads to the formation of a mixture of terpene oxygen-containing compounds (epoxides, alcohols, ketones, etc.). The problem of this direction is the formation of a large amount of 2,3-epoxypinane which over time turns into *trans*-sobrerol, campholene aldehyde, *trans*-pinocarveol, *trans*-carveol, and *trans*-3-pinen-2-ol as a result of hydrolysis. One of the abovementioned substances with a solid crystalline structure is *trans*-sobrerol. Sobrerol is widely used in perfumery for synthesis of synthetically fragrant substances and pharmaceutical industry, in particular, it is a part of medicines with mucolytic action, as well as in the treatment of headaches and diseases such as rhinorrhea and chronic bronchitis. The aim of this work is to identify a crystalline product produced by liquid-phase oxidation of α -pinene with atmospheric oxygen in the presence of cobalt (II) stearate. The process of liquid-phase oxidation was carried out in the following conditions: temperature – 70 °C, air consumption – 16.67 cm³/s, duration – 5 h, amount of catalyst – 0.2–0.5 wt.%. Then the mixture was exposed to steam distillation in order to separate monomers (they contain terpene oxygen-containing compounds and hydrocarbons) from polymers. As a result of settling and storage of the mixture, crystals were found and isolated from the mother liquor solution. Their identification was carried out using IR and ¹³C NMR spectroscopy as well as scanning electron microscopy. It was found that the spatial organization of the isolated crystals and the standard sample (Sigma Aldrich) is represented by multilayer rectangular plates. Analysis of the IR spectra of the crystals showed that the absorption band at a wave number of 3318 cm⁻¹ corresponds to intramolecular and intermolecular hydrogen bonds in hydroxyl groups, at wave numbers of 2887, 2935, 2975 cm⁻¹ it corresponds to methyl groups. The results obtained are comparable with the results of the IR-spectrum of the standard sample. Given the results of previous studies of ¹H NMR spectrum [15] and ¹³C NMR spectrum, it was determined that the resulting crystalline product of liquid-phase oxidation of α -pinene is *trans*-sobrerol.

For citation: Sosnovskaya A.A., Fleisher V.L. Identification of the Crystalline Product of Liquid-Phase Oxidation of α -Pinene with Atmospheric Oxygen in the Presence of Cobalt (II) Stearate. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 173–180. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-173-180

Keywords: α -pinene, *trans*-sobrerol, verbenol, verbenone, liquid-phase oxidation, cobalt (II) stearate, α -pinene epoxide.

УДК 661.183.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-181-189

ФОРМИРОВАНИЕ АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ШЛАМ-ЛИГНИНА

К.Б. Воронцов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [P-2313-2019](https://orcid.org/0000-0001-6369-7245),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-7245>

Н.И. Богданович, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

Е.Л. Седова, аспирант; *ResearcherID:* [AАН-6774-2020](https://orcid.org/0000-0003-0903-7304),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0903-7304>

П.В. Соловьева, аспирант; *ResearcherID:* [AАН-4645-2020](https://orcid.org/0000-0002-6102-4810),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6102-4810>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: k.vorontsov@narfu.ru, n.bogdanovich@narfu.ru, lelenasedova@mail.ru, p.solovjeva@narfu.ru

Аннотация. Эффективным способом переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности, в частности шлам-лигнина, является пиролиз, посредством которого получают товарный продукт – углеродный адсорбент. Наиболее распространенный метод – метод термохимической активации с использованием гидроксидов натрия и калия, позволяющий производить углеродные наноструктурированные материалы с высокими адсорбционными свойствами, особенно при адсорбции из жидкой фазы. Исследовано влияние условий синтеза углеродных адсорбентов из шлам-лигнина на их адсорбционные свойства с использованием в качестве активирующего агента гидроксида натрия. Шлам-лигнин выделяли в лабораторных условиях путем обработки лигнинсодержащей сточной воды коагулянтном оксихлоридом алюминия. Применили метод планированного эксперимента – ротатбельный центральный композиционный план второго порядка. Изучено действие основных факторов, определяющих адсорбционные свойства углей: температуры, продолжительности пиролиза и дозировки гидроксида натрия, – на выходные параметры, характеризующие эффективность адсорбции из жидкой фазы, т. е. иодное число и осветляющую способность по метиленовому голубому. Получили экспериментальные данные, по которым построили поверхности отклика, иллюстрирующие влияние перечисленных факторов на выходные параметры. Установлено положительное влияние температуры пиролиза и дозировки щелочи на адсорбционные свойства синтезированных углей. Адсорбционная активность по иоду составила 300 %, по метиленовому голубому – 1000 мг/г, что свидетельствует о развитой микро- и мезопористой поверхности и возможности использования данных соединений для адсорбции как газов и паров, так и органических веществ из растворов. Образцы синтезированных из шлам-лигнина активных углей были испытаны в качестве адсорбентов лигнина из сточной воды. Полученные зависимости коррелируют с данными, характеризующими влияние параметров пиролиза на осветляющую способность углей по метиленовому голубому. Показана высокая эффективность адсорбентов из шлам-лигнина при удалении лигнина из растворов – значение удельной адсорбции составило около 1500 мг/г.

Для цитирования: Воронцов К.Б., Богданович Н.И., Седова Е.Л., Соловьева П.В. Формирование адсорбционных свойств углеродных наноструктурированных материалов термохимической активации шлам-лигнина // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 181–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-181-189

Ключевые слова: шлам-лигнин, углеродный адсорбент, термохимическая активация, гидроксид натрия, адсорбционные свойства.

Введение

Шлам-лигнин – отход коагуляционной обработки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий. В промышленных масштабах коагуляционная очистка всегда осуществляется после биологической (например, стоки Байкальского целлюлозно-бумажного комбината). Технология же локальной очистки заключается в обработке лигнинсодержащих вод до стадии смешения их с другими стоками предприятия, т. е. перед стадией биологической очистки. Такой способ имеет достаточно высокую эффективность [1]. Применение данной технологии возможно только при условии переработки образующегося шлам-лигнина. На Байкальском целлюлозно-бумажном комбинате шлам-лигнин закачивался в карты-накопители или подвергался высушиванию и сжиганию. В первом случае значительное количество лигнинных веществ попадало в почву и водоемы, нанося вред экосистеме [5]; во втором – зола, являющаяся продуктом сгорания шлам-лигнина, также загрязняла окружающую среду. В дальнейшем были предложены различные методы использования данного осадка: в качестве сорбента [4], для производства буровых растворов [12], цемента [6], получения оксидов алюминия и железа [18] и др. – но они не нашли широкого применения.

Одним из перспективных путей переработки шлам-лигнина можно считать его пиролиз с последующим изготовлением товарного продукта – активированного угля [7]. Органо-минеральные сорбенты с развитой пористой структурой были получены в совмещенном процессе пиролиза – активации шлам-лигнина в среде водяного пара. Установлена возможность их применения для очистки сточных вод [7]. В настоящее время появилось много исследований, описывающих методы получения углеродных адсорбентов, в том числе из технических лигнинов, с использованием термохимической активации, преимуществом которой является образование углей с более высокими характеристиками поверхности и адсорбционными свойствами [17]. Эффективным активирующим реагентом для пиролиза углеродных материалов, имеющих неупорядоченную структуру, считается гидроксид натрия [16]. Термохимическая активация с его использованием позволяет получить материалы, имеющие высокую эффективность при адсорбции в жидкой фазе [19]. В России первые серьезные исследования термохимической активации гидроксидом натрия проводились в начале 2000-х г. коллективом ученых под руководством Н.И. Богдановича [8, 9]. В настоящее время значительная часть исследований процессов термохимической активации отходов переработки древесины проводится в Северном (Арктическом) федеральном университете имени М.В. Ломоносова [2, 11].

Целью данной работы являлся синтез углеродных адсорбентов термохимической активации шлам-лигнина и изучение их адсорбционных свойств.

Объекты и методы исследования

Шлам-лигнин получали в лабораторных условиях путем коагуляционной очистки модельной сточной воды оксихлоридом алюминия, исходя из оптимальных условий и режимных параметров обработки, установленных в [14]. Шлам-лигнин высушивали и проводили пиролиз с термохимической активацией, в качестве активирующего агента применяли гидроксид натрия. Исследова-

ния проводили методом планированного эксперимента, который, как известно из [2, 11], может быть реализован с использованием трехфакторного ротатбельного центрального композиционного плана второго порядка. Методика проведения опыта и математической обработки полученных данных приведены в [10]. Факторами, оказывающими решающее влияние на адсорбционные свойства углей, являются температура пиролиза ($T_{\text{пир}}$), его продолжительность (τ) и дозировка гидроксида натрия (D_{NaOH}). Они выбраны входными параметрами, уровни которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования входных параметров

Уровни параметров	Входные параметры		
	$T_{\text{пир}}, ^\circ\text{C}$	τ , мин	$D_{\text{NaOH}}, \%$
– α	650	30	120
–1	670	42	144
0	700	60	180
+1	730	78	216
+ α	750	90	240

Адсорбционные свойства активных углей (выходные параметры) оценивали по иодному числу (адсорбции иода – A_{I_2}) в соответствии с ГОСТ 33618–2015 и адсорбции метиленового голубого ($A_{\text{МГ}}$) по методике [3]. Иодное число характеризует микропористую структуру угля, а величина осветляющей способности по метиленовому голубому позволяет судить об объеме мезопор и, соответственно, о способности активных углей сорбировать из водных растворов крупные молекулы органических веществ.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные данные использованы для разработки статистических моделей, устанавливающих связь между значениями выходных характеристик и условиями пиролиза. Проверка моделей по критерию Фишера показала, что все они верны. Получены уравнения регрессии, описывающие данные математические модели. По уравнениям построены поверхности отклика, иллюстрирующие влияние перечисленных факторов на выходные параметры (рис. 1, 2).

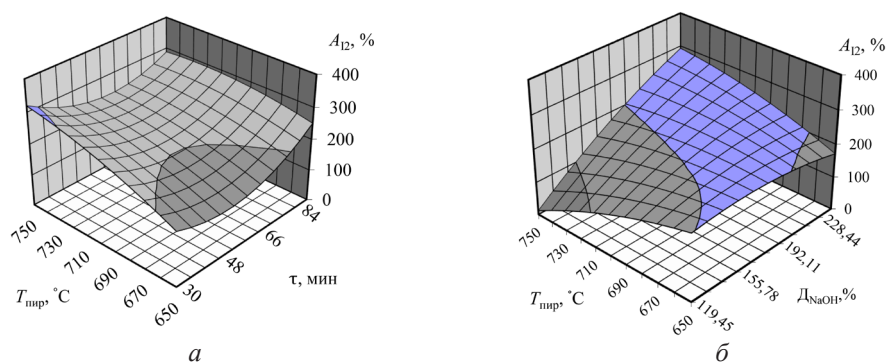


Рис. 1. Влияние режимных параметров на адсорбцию иода: *а* – при постоянной дозировке NaOH (180 %); *б* – при постоянной продолжительности пиролиза (60 мин)

Fig. 1. Influence of regime parameters on iodine adsorption: *a* – at a constant NaOH dosage (180 %); *b* – with constant pyrolysis duration (60 min)

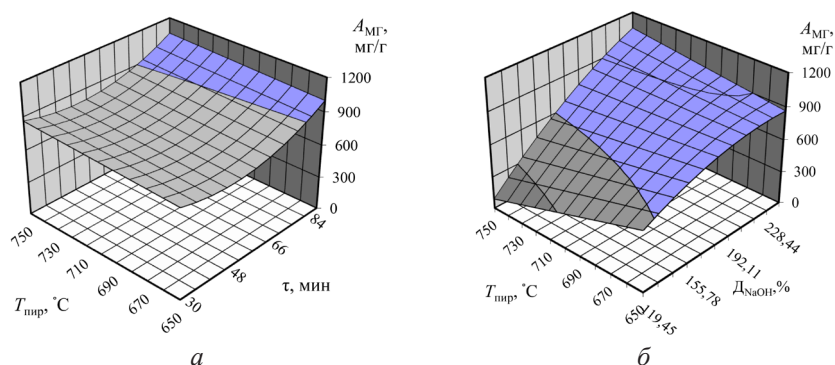


Рис. 2. Влияние режимных параметров на осветляющую способность по метиленовому голубому: *a* – при постоянной дозировке NaOH (180 %); *б* – при постоянной продолжительности пиролиза (60 мин)

Fig. 2. Influence of regime parameters on the adsorption capacity of methylene blue removal: *a* – at a constant NaOH dosage (180 %); *б* – with constant pyrolysis duration (60 min)

Все факторы оказывают определенное влияние на процесс формирования адсорбционных свойств полученных образцов: увеличение дозировки гидроксида натрия приводит к росту адсорбционных свойств, особенно при температуре пиролиза выше 700 °С (рис. 1, *б*; 2, *б*); зависимость от продолжительности процесса менее выражена, на 60...70-й мин от начала она минимальна (рис. 1, *a*; 2, *a*). Увеличение температуры пиролиза положительно сказывается на адсорбционных свойствах при дозировках гидроксида натрия 180 % и выше, при меньших долях щелочи с ростом температуры пиролиза адсорбционные свойства снижаются (рис. 1, *б*; 2, *б*).

Свойства сорбентов, полученных из шлам-лигнина путем пиролиза в среде водяного пара, имели относительно невысокие показатели: A_{I_2} – 37 %, A_{MG} – 35 мг/г [7]. Синтезированные нами методом термохимической активации с NaOH сорбенты обладают высокими значениями адсорбционной активности по иоду, которая достигает 300 %, и осветляющей способности по метиленовому голубому – до 1000 мг/г. Таким образом, угли из шлам-лигнина имеют развитую микро- и мезопористую структуру поверхности и могут быть использованы для адсорбции паров, газов и молекул органических веществ из растворов. При этом влияние режимных параметров пиролиза имеет схожий характер по отношению к адсорбции как иода, так и метиленового голубого.

Синтезированные нами образцы по своим адсорбционным свойствам не уступают углям, полученным тем же методом термохимической активации гидроксидом натрия, но из других видов технических лигнинов. Углеродные адсорбенты из гидролизного лигнина имеют адсорбционную активность по иоду 250 % и осветляющую способность по метиленовому голубому 600 мг/г [2], адсорбенты из черного щелока – 90 % и 550 мг/г соответственно [11, 21]. Активные угли из сульфатного лигнина характеризуются: A_{I_2} – 55...120 % [15, 22], A_{MG} – 650...950 мг/г [20, 23]. Следует отметить, что вышеперечисленные адсорбенты были получены при сравнительно меньших дозировках гидроксида натрия – 130...160 %. Это связано с наличием в составе шлам-лигнина определенного количества соединений алюминия, на реакции с которыми затрачи-

вается часть щелочи: происходит их растворение с образованием алюминатов натрия.

Образцы адсорбентов из шлам-лигнина были использованы нами для доочистки лигнинсодержащей сточной воды по технологии, ранее описанной в [13]. Эффективность оценивали по количеству удаленного из воды лигнина на 1 г угля ($A_{л}$, мг/г). Полученные зависимости (рис. 3) коррелируют с данными, характеризующими влияние параметров пиролиза на адсорбционные свойства углей по метиленовому голубому (рис. 2). Удельная адсорбция лигнина из сточной воды при ее доочистке составила около 1500 мг/г.

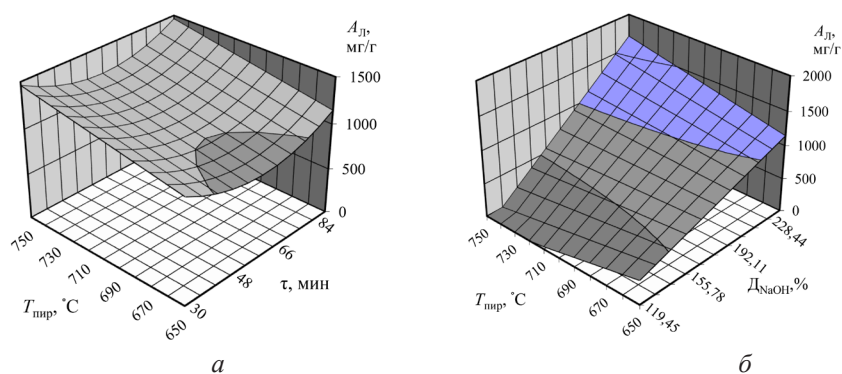


Рис. 3. Влияние режимных параметров на удельную адсорбцию лигнина: *а* – при постоянной дозировке NaOH (180 %); *б* – при постоянной продолжительности пиролиза (60 мин)

Fig. 3. Influence of regime parameters on specific adsorption of lignin: *a* – at a constant NaOH dosage (180 %); *b* – with constant pyrolysis duration (60 min)

Заключение

Углеродные адсорбенты, полученные из шлам-лигнина методом термохимической активации с гидроксидом натрия, обладают высокими адсорбционными свойствами: A_{12} – 300 %, $A_{МГ}$ – 1000 мг/г – и применимы при удалении лигнинных веществ из сточных вод. На формирование указанных свойств влияют температура, продолжительность пиролиза и дозировка щелочи. Для синтеза адсорбентов из шлам-лигнина можно рекомендовать следующие параметры пиролиза: температура – 730 °С, продолжительность – 80 мин, дозировка щелочи – 220 %. Особенностью получения данных активных углей является несколько более высокий расход гидроксида натрия по сравнению с сорбентами из гидролизного и сульфатного лигнина. В целом адсорбенты термохимической активации шлам-лигнина эффективны для очистки сточных вод от органических соединений, в том числе лигнина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Байбородин А.М., Воронцов К.Б., Богданович Н.И. Разработка системы локальной очистки сильнозагрязненных сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий // Вода: химия и экология. 2011. № 8. С. 16–21.

Bayborodin A.M., Vorontsov K.B., Bogdanovich N.I. Local Treatment of Heavily Polluted Sewage Waters of Pulp and Paper Industry. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2011, no. 8, pp. 16–21.

2. Белецкая М.Г., Богданович Н.И. Формирование адсорбционных свойств нанопористых материалов методом термохимической активации // Химия растит. сырья. 2013. № 3. С. 77–82.

Beletskaya M.G., Bogdanovich N.I. The Formation of Adsorption Properties of Nanoporous Materials by Thermochemical Activation. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2013, no. 3, pp. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.1303077>

3. Белецкая М.Г., Богданович Н.И., Макаревич Н.А. Технология углеродных адсорбентов // Физико-химический анализ активных углей. Архангельск: САФУ, 2015. 96 с.

Beletskaya M.G., Bogdanovich N.I., Makarevich N.A. *Carbon Adsorbent Technology. Physical and Chemical Analysis of Active Carbon*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 96 p.

4. Богданов А.В. Исследование сорбционно-коагуляционных свойств золы шлам-лигнина // Успехи современного естествознания. 2004. № 10. С. 22–26.

Bogdanov A.V. Examination Sorption-Coagulation of Properties of Ashes Ofstimes-Lignine. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2004, no. 10, pp. 22–26.

5. Богданов А.В., Шатрова А.С., Качор О.Л. Разработка экологически безопасной технологии утилизации отходов ОАО «Байкальский ЦБК» // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 2. С. 47–53.

Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Kachor O.L. Development of Environmentally Friendly Technology of Waste Utilization at the Baikal Pulp and Paper Mill. *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geosryology], 2017, no. 2, pp. 47–53.

6. Богданов А.В., Левченко Е.А., Шатрова А.С., Качор О.Л., Воробчук В.А. Получение сульфатсодержащего цемента из отходов ОАО «Байкальский ЦБК» // Перспективы науки. 2016. № 2(77). С. 18–22.

Bogdanov A.V., Levchenko E.A., Shatrova A.S., Kachor O.L., Vorobchuk V.A. Production of Sulfate-Containing Cement from Waste Products of ОАО Baikal Pulp and Paper Mill. *Perspektivy nauki* [Science Prospects], 2016, no. 2(77), pp. 18–22.

7. Богданович Н.И. Пиролиз технических лигнинов // Изв. вузов. Лесн. журн. 1998. № 2-3. С. 120–132.

Bogdanovich N.I. Pyrolysis of Technical Lignins. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1998, no. 2-3, pp. 120–132. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d70/120_131.pdf

8. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Добеле Г.В. Новые реагенты термохимической активации углеродных материалов в синтезе адсорбентов // Углеродные адсорбенты: материалы Второго междунар. семинара. Кемерово: ИУУ СО РАН, 2000. С. 16–18.

Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Dobelev G.V. New Reagents of Thermochemical Activation of Carbon Materials in the Synthesis of Adsorbents. *Carbon Adsorbents: Proceedings of the Second International Seminar*. Kemerovo, Institute of Coal and Coal Chemistry SB RAS Publ., 2000, pp. 16–18.

9. Богданович Н.И., Труфанова Н.В., Фадеев С.М. Термохимическая активация измельченных древесных материалов гидроксидом натрия // Актуальные проблемы теории адсорбции, модифицирования поверхности и разделения веществ: материалы VII Всерос. симп. М.: ИФХ РАН, 2002. С.158.

Bogdanovich N.I., Trufanova N.V., Fadeev S.M. Thermochemical Activation of Crushed Wood Materials with Sodium Hydroxide. *Current Problems of Adsorption, Surface Modification and Separation of Substances: Proceedings of the VII All-Russian Symposium*. Moscow, Institute of Physical Chemistry RAS Publ., 2002, p. 158.

10. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Третьяков С.И., Жабин В.И. Планирование эксперимента в примерах и расчетах. Архангельск: САФУ. 2010. 126 с.
- Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Tret'yakov S.I. *Planning Experiment in Examples and Calculations*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 126 p.
11. Лагунова Е.А., Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н. Влияние гидроксида натрия на процесс пиролиза черного щелока // Евразийский Союз Ученых. 2014. № 7-1. С. 85–87.
- Lagunova E.A., Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N. Effect of Sodium Hydroxide on the Process of Black Liquor Pyrolysis. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2014, no. 7-1, pp. 85–87.
12. Прончин К.В., Щербин С.А. Буровые растворы на основе крупнотоннажного отхода целлюлозного производства // Вестн. Ангар. гос. техн. акад. 2008. Т. 2, № 1. С. 21–23.
- Pronchin K.V., Shcherbin S.A. Drilling Muds Based on Large-Capacity Pulp Waste. *Vestnik Angarskoy gosudarstvennoy tekhnicheskoy akademii*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 21–23.
13. Седова Е.Л., Воронцов К.Б. Коагуляционно-адсорбционная очистка лигнинсодержащих сточных вод // Наука-RASTUDENT.RU. 2014. № 7. Режим доступа: <https://readera.org/koagulyacionno-adsorbcionnaja-ochistka-ligninsoderzhashhih-stochnyh-vod-14329735> (дата обращения: 09.06.21).
- Sedova E.L., Vorontsov K.B. Coagulation – Adsorption Lignin-Containing Waste Water. *Nauka-Rastudent.ru*, 2014, no. 7.
14. Седова Е.Л., Воронцов К.Б., Буркова С.А. Влияние условий коагуляционной обработки на эффективность очистки лигнинсодержащей сточной воды по данным планированного эксперимента // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 159–167.
- Sedova E.L., Vorontsov K.B., Burkova S.A. Influence of Coagulation Treatment on the Efficiency of Lignin Containing Wastewater Purification. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 159–167. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.159>
15. Bedmohata M.A., Chaudhari A.R., Singh S.P., Choudhary M.D. Adsorption Capacity of Activated Carbon Prepared by Chemical Activation of Lignin for the Removal of Methylene Blue Dye. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*, 2015, vol. 2, iss. 8, pp. 1–13.
16. Carrott P.J.M., Ribeiro Carrott M.R. Lignin – from Natural Adsorbent to Activated Carbon: A Review. *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98, iss. 12, pp. 2301–2312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.008>
17. Chistyakov A.V., Tsodikov M.V. Methods for Preparing Carbon Sorbents from Lignin (Review). *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2018, vol. 91, iss. 7, pp. 1090–1105. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427218070054>
18. Fedyaeva O.N., Vostrikov A.A., Artamonov D.O., Shishkin A.V., Sokol M.Ya. Combustion of Sludge-Lignin in Water-Oxygen Mixture. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, vol. 29, iss. 1, pp. 26–41. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1810232820010038>
19. Hayashi J., Kazehaya A., Muroyama K., Watkinson A.P. Preparation of Activated Carbon from Lignin by Chemical Activation. *Carbon*, 2000, vol. 38, iss. 13, pp. 1873–1878. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00027-0)
20. Khezami L., Chetouani A., Taouk B., Capart R. Production and Characterisation of Activated Carbon from Wood Components in Powder: Cellulose, Lignin, Xylan. *Powder Technology*, 2005, vol. 157, iss. 1-3, pp. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.009>
21. Ragan S., Megonnell N. Activated Carbon from Renewable Resources–Lignin. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2011, vol. 45, no. 7-8, pp. 527–531.

22. Sarkar M., Tian C., Jahan M.S. Activated Carbon from Potassium Hydroxide Spent Liquor Lignin Using Phosphoric Acid. *TAPPI Journal*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.32964/TJ17.02.63>

23. Torné-Fernández V., Mateo-Sanz J.M., Montané D., Fierro V. Statistical Optimization of the Synthesis of Highly Microporous Carbons by Chemical Activation of Kraft Lignin with NaOH. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2009, vol. 54, iss. 8, pp. 2216–2221. DOI: <https://doi.org/10.1021/jc800827n>

FORMATION OF ADSORPTION PROPERTIES OF CARBON NANOSTRUCTURED MATERIALS BY THERMOCHEMICAL ACTIVATION OF SLUDGE-LIGNIN

Konstantin B. Vorontsov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [P-2313-2019](https://orcid.org/0000-0001-6369-7245), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-7245>

Nikolay I. Bogdanovich, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

Elena L. Sedova, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAH-6774-2020](https://orcid.org/0000-0003-0903-7304),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0903-7304>

Polina V. Solovyova, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAH-4645-2020](https://orcid.org/0000-0002-6102-4810),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6102-4810>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: k.vorontsov@narfu.ru, n.bogdanovich@narfu.ru, lelenasedova@mail.ru, p.solovjeva@narfu.ru

Abstract. Pyrolysis is an effective way to process waste of the pulp and paper industry, in particular, sludge-lignin, which makes it possible to obtain a commercial product – a carbon adsorbent. The method of thermochemical activation using sodium and potassium hydroxides is now widely used in pyrolysis of wood waste processing. This method enables the production of carbon nanostructured materials with high adsorption properties, especially when adsorbed from the liquid phase. The paper studies the influence of conditions for the synthesis of carbon adsorbents of sludge-lignin on their adsorption properties using sodium hydroxide as an activating agent. Sludge-lignin was obtained under laboratory conditions by treating lignin-containing wastewater with aluminum oxychloride coagulant. We applied the method of the planned experiment: a rotatable central composite design of the second order for three factors. We studied the influence of the main factors determining the adsorption properties of coals, namely, temperature, pyrolysis duration and sodium hydroxide dosage, on the values of output parameters characterizing the adsorption efficiency from the liquid phase, i.e. the iodine number and the adsorption capacity of methylene blue removal. We obtained experimental data, which were used to construct response surfaces illustrating the influence of the experimental factors on the output parameters. The positive effect of pyrolysis temperature and alkali dosage on the adsorption properties of the synthesized coals was found. The following results were obtained: the adsorption activity for iodine – 300 %, for methylene blue – 1000 mg/g; indicating a developed micro- and mesoporous surface and the possibility of using these compounds for adsorption of both gases and vapors, and organic substances from solutions. Therefore, samples of activated carbons synthesized from sludge-lignin were tested as lignin adsorbents of lignin-containing wastewater. The obtained dependences correlate well with the data describing the influence of pyrolysis

parameters on the coal adsorption capacity of methylene blue removal. The high efficiency of adsorbents of sludge-lignin in the removal of lignin from solutions was shown. The value of the specific adsorption was about 1500 mg/g.

For citation: Vorontsov K.B., Bogdanovich N.I., Sedova E.L., Solovyova P.V. Formation of Adsorption Properties of Carbon Nanostructured Materials by Thermochemical Activation of Sludge-Lignin. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 181–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-181-189

Keywords: sludge-lignin, carbon adsorbent, thermochemical activation, sodium hydroxide, adsorption properties.



УДК 630*971

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-190-198

К ИТОГАМ XXV ВСЕМИРНОГО КОНГРЕССА ИЮФРО**В.С. Шалаев, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [AAC-8697-2019](https://orcid.org/0000-0002-1815-0176)*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1815-0176>**В.К. Тепляков, канд. с.-х. наук, проф.;** *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4428-4845>

Институт системных исследований леса – Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 1-я Институтская ул., д. 1, г. Мытищи-5, Московская обл., Россия, 141005; e-mail: shalaev@mgul.ac.ru, victortreplyakov@gmail.com

Аннотация. С 25 сентября по 5 октября 2019 г. в городе Куритиба (Бразилия) прошел XXV Всемирный конгресс Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО). В его работе приняли участие 2725 представителей академической, вузовской и отраслевой лесной науки, лесного бизнеса и лесных государственных и негосударственных организаций из 96 стран с более чем 2600 докладами и презентациями. Этот конгресс впервые прошел в Южной Америке. Его девиз «Лесные исследования и сотрудничество для устойчивого развития» подчеркнул обширную тематику деятельности Союза и отразил результаты работы по пяти основным направлениям Стратегии ИЮФРО на 2015–2019 гг., а также наметил новую Стратегию на период после 2020 г. Конгресс начался с общих мероприятий, среди которых: церемонии посадки деревьев и торжественного открытия, приветственный прием для всех участников. В соответствии с утвержденной Программой проведены пленарные заседания, технические сессии, тематические дискуссии, лекции, презентации, стендовые сессии и др. Были организованы профессиональные экскурсии – технические туры и тематические выставки продукции, технологий и услуг, необходимых и доступных для лесного сектора и лесных исследований. Вручены награды ИЮФРО по многим номинациям: за научные достижения, выдающиеся заслуги, лучший стендовый доклад – а также призы для студентов. Одно из решений – выбор в качестве места проведения XXVI Всемирного конгресса ИЮФРО в 2024 г. столицы Швеции г. Стокгольма; Президентом ИЮФРО (2019–2024 гг.) стал доктор Джон Парротта/John Parrotta (США); вице-президентами – профессор Даниэла Кляйншмит/Daniela Kleinschmit (Германия) и профессор Широнг Лью/Shirong Liu (Китай). В состав Правления вошла и Ольга Шайтарова из Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета. От России на Конгрессе было всего 8 участников, что отражает недостаточный уровень финансирования лесной науки в стране. Тем не менее несомненно дальнейшее участие наших ученых в работе конгрессов и деятельности ИЮФРО в целом.

Для цитирования: Шалаев В.С., Тепляков В.К. К итогам XXV Всемирного конгресса ИЮФРО // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 190–198. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-190-198

Ключевые слова: Всемирный конгресс ИЮФРО, лесная отраслевая наука, лесное сообщество, технологические инновации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare that there is no conflict of interest

Введение

С 25 сентября по 5 октября 2019 г. в городе Куритиба (Бразилия) прошел XXV Всемирный конгресс Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО, IUFRO) [7]. В мировом научном сообществе ИЮФРО – один из безусловных лидеров среди международных организаций, связанных с изучением природных ресурсов (в первую очередь лесов), их развитием, охраной, воспроизводством и рациональным использованием. Основанный в 1892 г. ИЮФРО давно стал глобальной ассоциацией, объединяющей в настоящее время более 15 000 ученых и практиков, работающих в почти 600 членских организациях, из более чем 126 стран мира [1–6, 9, 10]. С 1947 г. 15 организаций нашей страны стали членами этого союза [3–6]. ИЮФРО входит в многочисленные мировые общества, включая Международный совет по науке (ICSU), является частью Совместного партнерства по лесам (CPF).

Участие в работе Конгресса – это отличная возможность для обмена опытом и знаниями в области технологических инноваций, а также для знакомства с результатами новейших исследований и тенденциями, существующими в лесном хозяйстве и промышленности, направлениями актуальных лесных исследований. Как отметили И.С. Мелехов и Н.А. Моисеев: «Конгрессы ИЮФРО так же, как и мировые лесные конгрессы, дают много ценной информации, позволяющей судить о мировом уровне развития различных разделов лесной науки и практики, что в целом способствует ускорению развития научно-технического прогресса. Вместе с тем, участие в них ученых нашей страны позволяет шире популяризировать достижения нашей страны в различных областях лесной науки» [1, с. 130].

Участники события использовали уникальную возможность ознакомиться с лесами Бразилии и сопредельных стран. Конгресс стал платформой для обмена знаниями по всем научным дисциплинам, имеющим отношение к исследованиям лесов, был открыт для всех ученых независимо от их принадлежности к ИЮФРО. Тематика охватывала широкий круг вопросов и проблем лесного комплекса.

Для организации технических сессий и участия в них приглашали ученых со всего мира. Составлена программа, включающая 189 таких сессий. Основная часть заседаний Конгресса прошла на базе местного частного Университета Позитиво (Universidade Positivo). Уже на предварительном этапе в оргкомитет Конгресса поступило более 4000 аннотаций от более чем 3000 зарегистрировавшихся участников, причем четверть – от студентов. Больше всего тезисов было от страны-организатора – Бразилии, которая представила 927 заявок, за ней следовали Соединенные Штаты Америки (211), Индия (183), Нигерия (175), Китай (161), Германия (131), Колумбия (111) – всего 122 государства. От нашей страны заявлено 20 докладов, подготовленных 23 специалистами [7].

В работе Конгресса от России приняли участие 3 сотрудника Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова (СПбГЛТУ): руководитель делегации профессор Беленький Ю.И., профессор Алексеев А.С. и доцент Шайтарова О.Е. Кроме того, было по одному представителю от Ленинградского научно-исследовательского института сельского хозяйства «Белогорка» – Данилов Д.А., который также работает и

в СПбГЛТУ; от Института леса им. В.Н. Сукачева Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» – Баранчиков Ю.Н.; от Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН – Замолодчиков Д.Г.; от Института географии РАН – Птичников А.В.; от Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии (ВНИИЛБиотех) – Царев В.А.

Если принять общее число участников Конгресса в 2725 человек за 100 %, то показатель участия в данном мероприятии России – 0,29 % от общего числа (рис. 1, 2). Такая цифра не отражает уровень потенциала отечественной лесной науки. Остается надеяться только на перспективу развития, хотя в данном случае мы наблюдаем тенденцию к снижению уровня участия наших ученых в работе конгрессов. Следует отметить, впервые с 2010 г. среди докладчиков был представитель отраслевого лесного института (ВНИИЛБиотеха). Участники распределились примерно поровну между вузами и академическими НИИ.



Рис. 1. Характеристика активности международного научного лесного сообщества (по количеству делегатов на съездах-конгрессах ИЮФРО)

Fig. 1. Characteristics of the activity of the international scientific forest community (according to the number of delegates at the IUFRO Congresses)

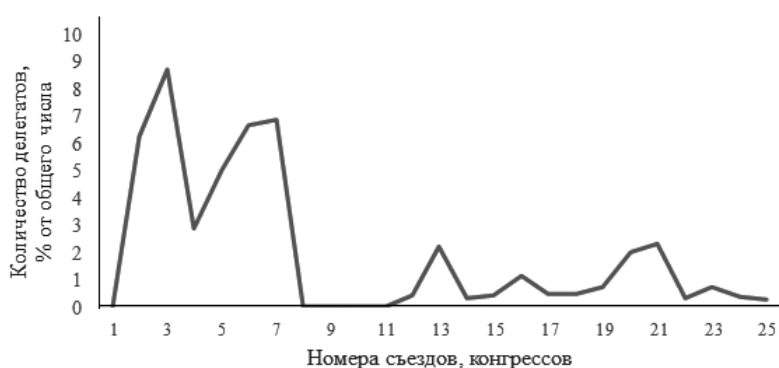


Рис. 2. Характеристика участия отечественного научного лесного сообщества (в процентах от общего числа делегатов на съездах-конгрессах ИЮФРО)

Fig. 2. Characteristics of the participation of the national scientific forest community (as percent of the total number of delegates at the IUFRO congresses)

В последнее время идет процесс «интернационализации» науки. Многие российские участники являются соавторами и содокладчиками (примерно в 20 представленных исследованиях), работая в больших международных коллективах. Этот факт говорит не только об участии россиян в Конгрессе, но и свидетельствует о явной недостаточности финансирования лесной науки в России. «Содокладчики» могли бы достойно представить нашу страну. Участие ее представителей в XXV Всемирном конгрессе ИЮФРО [5] предварительно подтверждается, хотя и не внушает гордости. Упомянутые показатели позволяют экстраполировать приведенные ранее характеристики [5] с учетом состоявшегося в Куритибе Конгресса (рис. 1, 2).

Девиз «Лесные исследования и сотрудничество для устойчивого развития» подчеркивает обширную тематику Конгресса и отражает 5 основных направлений Стратегии ИЮФРО на 2015–2019 г., а также структуру научной программы; названия докладов характеризуют в том числе и результативность работы Союза в рамках принятой Стратегии [3, 8, 9].

Работа Конгресса традиционно началась с общих мероприятий, среди которых: церемония посадки деревьев (было посажено 5 деревьев хвойной породы Араукария/Агаукария в ботаническом саду Куритибы); торжественная церемония открытия; приветственный прием для участников. Затем в соответствии с утвержденной Программой были проведены пленарные заседания, на которых с ключевыми докладами выступили ведущие ученые, политические деятели, бизнесмены [2, 7, 9].

30 сентября на первом пленарном заседании «Роль лесов, лесной продукции и лесных услуг в условиях изменения климата» с докладом «Потенциальный вклад лесного сектора в смягчение климатических изменений» выступил Вернер Курц/Werner Kurz из Канадской лесной службы, сосредоточив внимание участников на роли лесов и лесной продукции в преодолении последствий глобального потепления. Доклад и вся дискуссия на пленарном заседании были ориентированы на 4 ключевых вопроса.

1. Какой потенциал лесов и лесной продукции необходим, чтобы предотвратить глобальное потепление?

2. Какие процессы, действия, технологии обладают наибольшим потенциалом?

3. Как можно найти компромиссы, разрешить конфликты в области землепользования при реализации шагов и мер по смягчению последствий изменения климата, рассматривая производство продовольствия, древесного волокна, биоразнообразие, обеспечение водой и другие социально-экологические ценности?

4. Какие конкретные действия должны быть предприняты научным сообществом, включая ИЮФРО, для решения проблемы недостаточности научной информации у лиц, принимающих решения, и широкой общественности, а также для укрепления взаимодействия между наукой и политикой?

1 октября на пленарном заседании «Биоразнообразие, экосистемные услуги и биологические инвазии» выступили Генеральный секретарь Конвенции о международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой исчезновения (CITES, международного соглашения между правительствами), Ивонн Хигеро/Ivonne Higuero (Панама) и профессор Университета

Британской Колумбии (Канада) Сюзанна Симард/Suzanne Simard с докладом «Голос Матери-дерева».

2 октября на пленарном заседании «Леса для людей» представили свои доклады Пураби Бозе/Purabi Bose (Индия) – «Взаимодействие людей в контексте лесного научного сообщества» и Мария Кьяра Пасторе/Maria Chiara Pastore (Миланский политехнический университет, Италия) – «Леса для людей».

4 октября на пленарном заседании «Леса и лесная продукция для зеленого будущего» прозвучали выступления Винсента Гитца/Vincent Gitz (Франция/Индонезия) «Растущие леса и деревья для более зеленого будущего» и Франческо Карлоса Раззолини/Francisco Carlos Razzolini (Бразилия) – представителя крупнейшей бразильской промышленной компании, ведущего специалиста по исследованиям и разработке, инновациям, устойчивому развитию, проектам по автоматизации производства бумаги и упаковки.

5 октября на пленарном заседании «Взаимодействия лесов, почвы и воды» выступили профессор Майн ван Нордвейк/Meine van Noordwijk из Университета г. Вагенинген, Нидерланды, работающий также в Индонезии, с докладом «Взаимоотношения климата, леса, воды и людей в рамках системы земля–деревья» и Дипак Гявали/Dipak Guawali из Академии наук и технологий Непала с докладом «Взаимодействия лесов, почвы и воды – политическая перспектива».

На состоявшихся 189 технических сессиях с тематическими дискуссиями было представлено 1648 лекций и презентаций, а на стендовых сессиях – 964 постера, освещающих исследования, проводимые по всему миру. В рамках работы Конгресса 3 октября организованы профессиональные экскурсии – технические туры – участникам предоставили возможность познакомиться с лесами, значительным техническим опытом и культурой Бразилии, живописными местами, лесными компаниями, традиционными сообществами и научно-исследовательскими учреждениями.

Делегаты Конгресса участвовали в разнообразных по тематике экскурсиях: «Лесохозяйственные операции в питомниках сосны и эвкалипта в Клабине, крупнейшем в Бразилии производителе и экспортере бумаги», «Оплата экологических услуг: история успеха», «Исторические водохранилища и тропы Куритибы в местных лесах», «Песчаные образования, кратеры с местной растительностью и водохранилищами, с акцентом на исчезающие виды», «Различные способы и модели восстановления лесов», «Ботанический сад Куритибы, городские леса и парки в окрестностях города», «Парки Куритибы: Ботанический сад, Папский лес, Германский лес и др.», «Борьба с лесными вредителями насаждений эвкалипта в Бразилии», «Национальная лесная инвентаризация, дендрохронология, применяемая для управления лесами, сохранения и генетического улучшения хвойных пород», «Интегрированные системы агролесоводства и экологические агролесомелиоративные системы», «Обзор лесозаготовок, лесоустройства и лесопользования в Бразилии», «Представление программного обеспечения для управления лесами», «Лесной сектор, государственное планирование и бизнес-представительства производственной цепочки переработки древесины, консалтинговые компании и управление лесами», «Системы агролесоводства в различных организационных структурах, лесовосстановление с быстрорастущими видами и природоохранными областями», «Недревесные

лесные продукты», «Пальмовые плантации и исследование естественных лесов».

Для представителей государственных и частных бизнес-структур была организована тематическая выставка продукции, технологий и услуг, необходимых и доступных для лесного сектора и лесных исследований.

На Конгрессе в торжественной обстановке были вручены награды ИЮФРО по многим номинациям. Среди них награды 2019 г.:

«За научные достижения»: С. Эллен Макдональд/S. Ellen Macdonald (Канада); Хосе Леонардо де Мораес Гонсалвес/José Leonardo de Moraes Gonçalves (Бразилия); Мария Нижник¹/Maria Nijnik (Шотландия/Нидерланды); Дэвид Дж. Новак/David J. Nowak (США); Елена Паолетти/Elena Paoletti (Италия); Мариелос Пена-Кларос/Marielos Pena-Claros (Боливия/Нидерланды); Теренс С.Х. Сандерленд/Terence S.H. Sunderland (Канада/Великобритания); Маргарита Томе/Margarida Tome (Португалия); Даовэй Жанг/Daowei Zhang (США/Китай); Джунёнг Жу/Junyong Zhu (США/Китай);

«За незаурядное (выдающееся) диссертационное исследование»: Анже-ла Л. Де Авила/Angela L. De Avila (Бразилия/Германия); Андреа Хэвиа Кабал/Andrea Hevia Cabal (Испания); Вероника Ф. Лови Муньос/Verónica F. Loewe Munoz (Чили); Личао Джяо/Lichao Jiao (Китай); Рубен Вальбуэна/Rubén Valbuena (Великобритания); Ида Валлин/Ida Wallin (Германия); Жен Ю/Zhen Yu (Китай/США); Рене Замора-Кристалис/René Zamora-Cristales (США);

«За достижения в области наук о лесе» (награда студентам по представлению Международной ассоциации лесных студентов, IFSA): Шанкар Адхикари/Shankar Adhikari (Непал); Катарина Альбрич/Katharina Albrich (Австрия); Шоурав Дутта/Shourav Dutta (Бангладеш); Анге Рахаривололонияйна/Ange Raharivololoniaina (Мадагаскар); Андреа М. Васкес Фернандес/Andrea M. Vasquez Fernandez (Канада/Перу); Халил Валджи/Khalil Walji (Италия);

«Почетный член ИЮФРО»: Нильс Элерс Кох/Niels Elers Koch, президент ИЮФРО в 2009–2014 гг. (Дания).

30 сентября активисту лесного хозяйства из Бурунди Леонидасу Нзигийимпа/Léonidas Nzigiyimpa была вручена Награда Вангари Маатаи от Совместного партнерства по лесам (CPF) в знак признания его страстной приверженности и выдающегося вклада в улучшение лесов и жизни коренных народов, женщин и молодежи в его стране.

«За лучшую стендовую презентацию» отмечены: Элизабет Нейре да Силва/Elizabeth Neire da Silva (Бразилия) – «Пример из практики: Действия по исправлению положения на антропогенном участке ручья Санто-Антониу-ду-Грама в Минас-Жерайс»; Ангелина Мартини/Angeline Martini (Бразилия) – «Охлаждающий потенциал растительности городских скверов для их непосредственного окружения в Куритибе (Парана, Бразилия)»; Масакадзу Г. Ивайзуми/Masakazu G. Iwaizumi (Япония) – «Географические клины в генетическом разнообразии и вариативность в адаптивных признаках двух основных

¹Первый случай в истории ИЮФРО, когда дочь получила награду, как и в 2000 г. получил ее отец, профессор С.А. Генсирук (Украина).

пород сосны (*Pinus densiflora* и *Pinus thunbergii*) в Японии»; Воййо Атакрам/Woyyo Atakram (Того) – «Использование дермато-косметических растений в сельских сообществах района Караско в Того»; Наохиро Имамура/Naohiro Imamura (Япония) – «Вертикальное распределение ¹³⁷Cs в лесных почвах Японии после аварии на АЭС «Фукусима»: мета-анализ»; Джованни Мastroлонардо/Giovanni Mastrolonardo (Италия) – «Карбоновые почвы: огромное экологическое и культурное наследие»; Луис Фелипе де Кастро Галиция/Luiz Felipe de Castro Galizia (Испания / Финляндия) – «Моделирование возникновения лесных пожаров на плантации эвкалипта в бразильской саванне»; Чегун Блез Четан/Tchegoun Blaise Tchetan (Бенин) – «Пространственно-временной анализ антропогенной деятельности по данным, собранным рейнджерами в Национальном парке Бенина».

«Научная награда представителю страны-организатора Всемирного конгресса ИЮФРО» была вручена выдающимся ученым Бразилии: Себастьяну Мачадо/Sebastião Machado, Хосе Наталино Силва/José Natalino Silva, Селсо Фоелкелю/Celso Foelkel, Марие Хосе Закия (Зезе)/Maria José Zakia (Zezé).

«Награда за выдающиеся заслуги» вручена председателю Оргкомитета Конгресса Йоберто Велозу де Фрейтас/Joberto Velosode Freitas (Лесная служба Бразилии), сопредседателям Оргкомитета Йеде Мария Малхейрос де Оливейра/Yeda Maria Malheiros de Oliveira (Бразилия), Петру Пасхалис-Якубовичу/Piotr Paschalis-Jakubowicz (Польша), Джону А. Стантурфу/John A. Stanturf (США) и председателю Научного комитета Конгресса Джерому К. Ванкляю/Jerome K. Vanclay (Австралия).

Основные решения XXV Всемирного конгресса ИЮФРО следующие:
столица Швеции г. Стокгольм выбрана местом проведения XXVI Всемирного конгресса ИЮФРО 2024 г.;

Президентом ИЮФРО (2019–2024 гг.) избран доктор Джон Парротта/John Parrotta (Лесная служба США);

вице-президентами ИЮФРО – профессора Даниэла Кляйншмит/Daniela Kleinschmit (Германия) и Широнг Лью/Shirong Liu (Китай);

руководителями девяти Отделений ИЮФРО – соответственно Дж. П. Скoвсгаард/J. P. Skovsgaard (Швеция), Сантьяго Гонсалес-Мартинес/Santiago Gonzales-Martinez (Франция), Вудам Чунг/Woodam Chung (США), Дональд Г. Ходжес/Donald G. Hodges (США), Пекка Саранпаа/Pekka Saranpaa (Финляндия), Сесил Конийнендийк ван ден Бош/Cecil Konijnendijk van den Bosch (Нидерланды/Канада), Экехард Брокерхофф/Eckehard Brockerhoff (Новая Зеландия), Сандра Луке/Sandra Luque (Франция/Аргентина), Моника Габай/Monica Gabau (Аргентина);

по списку Президента в состав Правления (Board) вошли: Эрих Гомес Шайца/Erich Gomez Schaitza (Бразилия), Ольга Шайтарова/Olga Shaitarova (Россия), Кугбо Шим/Kugbo Shim (Корея), Вубалем Тадессе/Wubalem Tadesse (Эфиопия), Ксяо Венфа/Xiao Wenfa (Китай), Елена Паолетти/Elena Paoletti (Италия), Хуберт Хазенауэр/Hubert Hasenauer (Австрия);

принята Стратегия ИЮФРО на период после 2020 г.;

подписан Меморандум о взаимопонимании между ИЮФРО и Всемирным фондом дикой природы (WWF).

Заключение

Впервые Конгресс ИЮФРО был проведен в Южной Америке, в одной из наиболее многолесных стран мира – в Бразилии. В работе XXV Всемирного конгресса ИЮФРО приняли участие с более чем 2600 докладами и презентациями 2725 представителей 96 государств.

От нашей страны было 8 участников, что составило 0,29 % от общего числа – наименьший процент за все годы существования ИЮФРО и участия СССР/России в конгрессах [5], причем на этом Конгрессе, как и на всех предыдущих, не присутствовали ни наши студенты, ни наши аспиранты. Впервые с 2010 г. в работе Конгресса принял участие представитель отраслевой лесной науки – сотрудник ВНИИЛБиотеха.

Среди награжденных по всем номинациям отсутствуют представители России, что отражает не только малую долю участия в ИЮФРО наших НИИ и вузов, низкую активность их ученых, но и подтверждает недостаточный уровень финансирования лесной науки в нашей стране. Несомненна перспектива участия российских ученых в работе последующих конгрессов и деятельности ИЮФРО в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мелехов И.С., Моисеев Н.А. 90 лет ИЮФРО (IUFRO) // Изв. вузов. Лесн. журн. 1982. № 4. С. 127–131.

Melekhov I.S., Moiseev N.A. 90 Years of IUFRO. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1982, no. 4, pp. 127–131. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1982/%E2%84%964-1982.pdf>

2. Санкт-Петербургский государственный университет им. С.М. Кирова: официальный сайт. Режим доступа: <https://spbftu.ru/category/events/> (дата обращения: 08.06.2021).

Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov: Materials of the SPbSFTU Website (Archives, Events).

3. Тепляков В.К., Шалаев В.С. История съездов ИЮФРО и Россия: в 2 т. Т. 1. 2-е изд., испр. и доп. М.: МГУЛ, 2015. 372 с.

Teplyakov V.K., Shalaev V.S. *A History of IUFRO Congresses and Russia*: In 2 Vol. Vol. 1. Moscow, MSFU Publ., 2015. 372 p.

4. Тепляков В.К., Шалаев В.С. История съездов ИЮФРО и Россия: в 2 т. Т. 2. 2-е изд., испр. и доп. М.: МГУЛ, 2015. 469 с.

Teplyakov V.K., Shalaev V.S. *A History of IUFRO Congresses and Russia*: In 2 Vol. Vol. 2. Moscow, MSFU Publ., 2015. 469 p.

5. Шалаев В.С. Научно-исследовательская работа. Конспект лекций. Ч. 1. М.: МГУЛ, 2016. 72 с.

Shalaev V.S. *Research Work. Prospectus of Lectures*. Part 1. Moscow, MSFU Publ., 2016. 72 p.

6. Шалаев В.С., Тепляков В.К. Анализ участия отечественных представителей в съездах и конгрессах ИЮФРО // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 9–20.

Shalaev V.S., Teplyakov V.K. Analysis of the National Representatives' Participation in the IUFRO Conventions and Congresses. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 3, pp. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.9>

7. XXV IUFRO World Congress 2019 “Forest Research and Cooperation for Sustainable Development”: *Materials of the Congress Website*. Available at: <https://iufro2019.com/> (accessed 20.01.20).

8. *IUFRO Strategy 2015–2019. Interconnecting Forests, Science and People*. 28 p. Available at: <https://www.iufro.org/uploads/media/iufro-strategy-2015-2019-small-version.pdf> (accessed 20.01.20).

9. *International Union of Forest Research Organizations: Materials of the IUFRO Website*. Available at: <http://www.iufro.org> (accessed 20.01.20).

10. Johann E., Buck A., Burger B., Kleine M., Prüller R., Wolfrum G. *125 Years of IUFRO. History of the International Union of Forest Research Organizations 1892–2017*. Vienna, IUFRO. 128 p.

TOWARDS THE RESULTS OF THE XXV IUFRO WORLD CONGRESS

Valentin S. Shalaev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-8697-2019](https://orcid.org/0000-0002-1815-0176),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1815-0176>

Victor K. Teplyakov, Candidate of Agriculture, Prof.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4428-4845>

Institute of System Forest Research, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, 1-ya Institutskaya ul., 1, Mytishchi-5, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: shalaev@mgul.ac.ru, victortepliyakov@gmail.com

Abstract. The XXV World Congress of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) was held in Curitiba (Brazil) from September 25 to October 5, 2019. Representatives (2725 people) of forest academic, university and sector science, forestry business, and forestry governmental and non-governmental organizations from 96 countries attended the Congress and made over 2600 reports and presentations. For the first ever time this Congress was held in South America. The Congress motto “Forest Research and Cooperation for Sustainable Development” highlighted the broad subject of the Congress and showed the results of the five major directions of the IUFRO Strategy 2015–2019. The work of the Congress began with general events, including Tree Planting Ceremony, Congress Opening Ceremony, and Welcome Reception for all participants. Plenary Sessions, Technical Sessions, Thematic Discussions, Lectures and Presentations, and Poster Sessions were held according to the Official Program. Professional Excursions, namely Technical Tours and Thematic Exhibitions of products, technologies and services needed and available for the forest sector and forest research were provided. During the Congress, numerous IUFRO awards were delivered to the laureates, including the IUFRO Scientific Achievement Award, Distinguished Service Award, IUFRO Best Poster Award, as well as awards for students. Among the most important decisions of the XXV IUFRO World Congress are the following: Stockholm was selected as the next venue for the XXVI IUFRO World Congress in 2024; Dr. John Parrotta (USA) was elected President of IUFRO (2019–2024); Professor Daniela Kleinschmit (Germany) and Professor Shirong Liu (China) were elected IUFRO Vice Presidents. The representative of our country Olga Shaitarova from the Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov became a member of the Board. Only eight participants from our country attended the Congress that confirms the insufficient level of financing of forest science in our country. Nevertheless, there is undoubtedly a significant prospect for the participation of Russian scientists in subsequent congresses and the activity within the IUFRO framework in general.

For citation: Shalaev V.S., Teplyakov V.K. Towards the Results of the XXV IUFRO World Congress. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 190–198. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-190-198

Keywords: IUFRO World Congress, forest sector science, forest community, technological innovations.