

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

1/373

2020

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Билей П.В., д-р техн. наук, проф., акад. ЛАН Украины (Украина, Львов)
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, Ороне)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Моисеев Н.А., д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Морозов В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Селиховкин А.В., д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёренсен У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Тельшева Г.М., д-р хим. наук, проф. (Латвия, Рига)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833
Issued as part of the
“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958
Published 6 times a year

1/373

2020

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Biley P.V., Doctor of Engineering, Prof., Member of the Forest Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Lviv)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry Sciences, Prof., Member of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Moiseev N.A., Doctor of Agriculture, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Morozov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Selikhovkin A.V., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
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)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>А.В. Волокитина, Т.М. Софронова, М.А. Корец.</i> Прогнозирование поведения пожаров растительности	9
<i>Л.В. Ветчинникова, А.Ф. Титов.</i> Карельская береза: разновидность или самостоятельный вид?.....	26
<i>А.С. Соломенцева, Н.И. Лебедь, С.В. Колмукиди, А.С. Межевова.</i> Подбор устойчивых видов <i>Rosa L.</i> для целей лесомелиорации, озеленения и использования в биотехнологии (на примере Волгоградской области)	49
<i>О.И. Гаврилова, И.В. Морозова, Ю.В. Ольхин, А.Л. Юрьева, А.О. Иоффе.</i> Динамика роста и оценка состояния культур сосны обыкновенной на вейниково-луговиковых вырубках методами дистанционного зондирования	63
<i>И.А. Гончарова, Л.Н. Скрипальщикова, А.П. Барченков, А.С. Шушпанов.</i> Оценка компонентов нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных березняках Красноярской лесостепи	75
<i>П.А. Феклистов, М.В. Аверина, И.Н. Болотов, Б.Ю. Филиппов, Д.Н. Клевцов.</i> Изменение густоты и видового состава подроста при разном удалении от «стен» леса на постагрогенных площадях	88
<i>Д.Н. Солдатова, А.С. Ильинцев.</i> Рост и продуктивность лесных культур сосны С.В. Алексеева на Европейском Севере России	99

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>А.Н. Заикин, А.С. Торопов, В.М. Меркелов, В.В. Сиваков.</i> Повышение эффективности работы машин и оборудования при заготовке древесины в лесах с радиоактивным загрязнением	113
<i>С.Н. Орловский.</i> Обоснование технологии механизированной лесочистки лож водохранилищ и компоновки оборудования для ее выполнения	128

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>A.A. Lukash, N.P. Lukutsova.</i> Thermal Conductivity of Wood-based Cellular Structures	146
<i>А.Г. Гороховский, В.В. Побединский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Побединский.</i> Моделирование процесса сушки пиломатериалов	154
<i>В.К. Любов, А.Н. Попов.</i> Эффективность сжигания древесного топлива в водогрейных котлах КВУ-2000	167

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

<i>А.Н. Романова, Я.В. Казаков, А.В. Малков.</i> Количественная характеристика полей локальных деформаций в образце картона топлайнер при одноосном растяжении	180
--	-----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

<i>В.А. Шамаев.</i> Исследование модифицированной древесины методом электронной микроскопии	190
<i>А.А. Пекарец, О.А. Ерохина, В.В. Новожилов, Ю.Г. Мандре, Э.Л. Аким.</i> Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов	200



CONTENTS

FORESTRY

<i>A.V. Volokitina, T.M. Sofronova, M.A. Korets.</i> Vegetation Fire Behavior Prediction	9
<i>L.V. Vetchinnikova, A.F. Titov.</i> Curly Birch: A Variety or a Separate Species?	26
<i>A.S. Solomentseva, N.I. Lebed', S.V. Kolmukidi, A.S. Mezhevova.</i> Selection of Resistant Species of <i>Rosa</i> L. for the Purposes of Forest Reclamation, Landscaping and Use in Biotechnology (On the Example of Volgograd Region)	49
<i>O.I. Gavrilova, I.V. Morozova, Yu.V. Olkhin, A.L. Yureva, A.O. Ioffe.</i> Growth Dynamics and Status Assessment of Scots Pine Crops on Reedgrass Meadow Cuts by Remote Sensing Techniques.....	63
<i>I.A. Goncharova, L.N. Skripal'shchikova, A.P. Barchenkov, A.S. Shushpanov.</i> Understory Vegetation Cover Components Assessment in Anthropogenically Disturbed Birch Stands of Krasnoyarsk Forest-Steppe	75
<i>P.A. Feklistov, M.V. Averina, I.N. Bolotov, B.Yu. Filippov, D.N. Klevtsov.</i> Changes in Density and Species Composition of Undergrowth at Different Distances from the Forest Edges in Postagrogenic Areas	88
<i>D.N. Soldatova, A.S. Ilintsev.</i> Growth and Productivity of Pine Forest Crops Named after S.V. Alekseev in the European North of Russia	99

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>A.N. Zaikin, A.S. Toropov, B.M. Merkelov, V.V. Sivakov.</i> Operating Efficiency Improvement of Machinery and Equipment while Logging in Forests with Radioactive Contamination	113
<i>S.N. Orlovsky.</i> Substantiation of the Technology of Mechanized Clear-Cutting of Reservoir Beds and Equipment Arrangement for Its Implementation	128

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>A.A. Lukash, N.P. Lukutsova.</i> Thermal Conductivity of Wood-Based Cellular Structures	146
<i>A.G. Gorokhovskiy, V.V. Pobedinsky, E.E. Shishkina, E.V. Pobedinskiy.</i> Modeling the Process of Sawm Timber Drying.....	154
<i>V.K. Lyubov, A.N. Popov.</i> Combustion Efficiency of Wood Fuel in the Water Boilers KVVU-2000	167

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

<i>A.N. Romanova, Ya.V. Kazakov, A.V. Malkov.</i> Quantitative Characteristics of Local Strain Fields in a Top-Liner Board Sample under Uniaxial Tension	180
--	-----

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

<i>V.A. Shamaev</i> . Study of Modified Wood by Electron Microscopy	190
<i>A.A. Pekarets, O.A. Erokhina, V.V. Novozhilov, Yu.G. Mandre, E.L. Akim</i> . Elastic and Relaxation Properties of Larch Wood and Their Role in Production of Wood and Charcoal Briquettes	200



УДК 630*432

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-9-25

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ*А.В. Волокитина¹, д-р с.-х. наук, ResearcherID: [D-2518-2019](#),**ORCID: [0000-0002-4007-6048](#)**Т.М. Софронова², канд. с.-х. наук; ResearcherID: [B-1193-2011](#),**ORCID: [0000-0002-9840-4657](#)**М.А. Корец¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [P-9487-2015](#), ORCID: [0000-0002-5015-5874](#)*¹Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, Академгородок, 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: volokit@ksc.krasn.ru²Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева, ул. Ады Лебедевой, д. 89, г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: tmsofronova@gmail.com

Необходимость в прогнозировании поведения пожаров растительности, включая лесные, особенно остро ощущается во время сильных засух, которые периодически повторяются на той или иной территории, а точный их прогноз пока затруднен. Содержать в каждом регионе достаточные силы и средства для подавления всех возникающих пожаров нереально. Только наращивание технической мощи проблему не решит, о чем свидетельствует опыт развитых стран, где большое внимание, наряду с оценкой пожарной опасности, уже давно стали уделять разработке системы прогноза поведения пожаров. В России такой системы пока нет, а использование зарубежного опыта не представляется возможным, так как осложнено рядом факторов и, прежде всего, разными исторически сложившимися подходами к пирологической классификации растительности и ее инвентаризации. В настоящее время существуют все предпосылки для создания российской системы прогноза поведения пожаров растительности (включая лесные): имеются фундаментальные пирологические разработки по результатам исследований природы пожаров; создана и развивается система мониторинга пожаров; совершенствуется оценка пожарной опасности, как природная, так и по условиям погоды. В статье приведена принципиальная схема прогноза поведения пожаров растительности и рассмотрены ее главные компоненты. Для прогноза скорости распространения горения выбрана практическая модель, для которой имеется необходимая информационная база в геоинформационной системе. Разработаны, ретроспективно проверены и зарегистрированы компьютерные программы для создания карт растительных горючих материалов и прогноза поведения низовых лесных пожаров, которые составляют до 97 % от всех возникающих. Приведены примеры этих карт для Чунского участкового лесничества (Красноярский край) в разные периоды пожароопасного сезона, созданные на основе использования лесоустроительной информации и определителя типов основных проводников горения – первой группы растительных горючих материалов, что непосредственно отражено на картах. Информация по другим группам растительных горючих материалов, поддерживающих, задерживающих горение или не участвующих в процессе распространения горения, прилагается к карте в виде пирологического описания. Приведен перечень данных, содержащихся в этом описании, а также причины, сдерживающие внедрение в практику лесопожарной охраны имеющихся в России пирологических разработок по прогнозу поведения пожаров растительности.

Для цитирования: Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А. Прогнозирование поведения пожаров растительности // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-9-25

Ключевые слова: пожар растительности, поведение пожаров, модель распространения горения, информационная база данных, программа прогноза распространения низового пожара.

Пожары, возникающие на территориях, покрытых лесной, степной, кустарниковой, болотной и другой растительностью, уже давно являются для человечества нерешенной глобальной проблемой. Особенно большой ущерб наносят лесные пожары в периоды сильных засух. Борьба с огненной стихией, даже при использовании мощных и дорогостоящих технических средств, зачастую недостаточно эффективна. Поэтому самое серьезное внимание должно уделяться профилактике всех пожаров растительности, так как крупные развиваются из пожаров небольших, потушенных или плохо локализованных. Необходимо также контролировать возникновение каждого пожара, но в условиях недостатка сил и средств это возможно только с помощью прогнозирования его поведения. Поведение пожара, возникшего на любой территории с растительностью, включая лесную, можно охарактеризовать скоростью пламенного или беспламенного распространения горения и его интенсивностью. Кроме того, необходимо оценить возможность перехода пожара из одного вида в другой, например из низового в верховой или почвенный, а также спрогнозировать последствия горения на том или ином участке. Так, вполне реально до пожара оценить возможный отпад в древостое по спрогнозированной интенсивности горения при данных метеорологических условиях, древесной породе и среднем диаметре ствола. На рис. 1 приведена схема прогноза поведения пожара растительности.



Рис. 1. Принципиальная схема прогноза поведения пожара растительности

Fig. 1. Principle diagram of vegetation fire behavior prediction

Цель данной работы – на основе анализа литературных данных, в том числе зарубежных, и использования результатов собственных многолетних пирологических исследований показать необходимость и возможность прогнозирования поведения пожаров растительности в России.

Наиболее развитые системы прогноза поведения пожаров растительности используются в США [42, 43] и Канаде [45, 58]. Подробное описание этих систем и сложности их применения в России и ряде европейских стран были рассмотрены ранее [14]. Показано, что использование канадской системы в России (даже при некотором сходстве природных условий) не приведет к желаемым результатам, а только затормозит разработку российской системы.

В нашей стране до сих пор нет специальной государственной системы по прогнозу поведения пожаров растительности.

Руководителям тушения пожаров рекомендуется при сложной лесопожарной обстановке составлять прогнозы поведения пожаров, используя план лесонасаждений и примерные пирологические характеристики для некоторых типов леса [35, 36]. Но такие характеристики имеются только для 7 типов леса в европейской части страны и для 4 типов леса на Дальнем Востоке. Для огромной территории Урала и Сибири с множеством типов леса такая информация отсутствует.

Экспериментальные исследования в таежных лесах, направленные на изучение пирологических характеристик разных напочвенных покровов в зависимости от условий погоды, были начаты в России под руководством основоположника лесной пирологии академика И.С. Мелехова. Результатом явилась классификация главной группы напочвенных горючих материалов – выделение типов основных проводников горения с их пирологическими характеристиками [10]. Продолжение этих исследований нашло отражение в новом направлении лесной пирологии – в картографировании растительных горючих материалов (РГМ), которое позволило начать разработку методов прогнозирования поведения пожаров растительности применительно к условиям России [14, 63].

В нашей стране создана и успешно развивается система мониторинга лесных пожаров [7, 8]. Даже были предложения дистанционно отслеживать распространение пожаров, используя дополнительно мелкомасштабные карты растительности [6]. Однако это нереально осуществить на практике: подобные карты не содержат необходимую для прогноза поведения пожара пирологическую характеристику РГМ, они отражают древесную породу и состав древостоя, но в них нет информации о напочвенном покрове, который может значительно отличаться по скорости пожарного созревания и интенсивности горения при данных погодных условиях даже под пологом одной древесной породы с одинаковой полнотой. Кроме того, дистанционный прогноз чаще всего затруднен задымлением и облачностью. Поэтому для прогноза поведения пожаров, их контролирования и тушения необходимы крупномасштабные карты РГМ, отражающие прежде всего основные проводники горения, их пирологические характеристики, а также и другие группы растительных горючих материалов [12, 24, 25].

Дистанционные методы могут быть использованы при оценке степени повреждения пройденных пожарами территорий [9]. Но одной из главных задач прогноза поведения возникших пожаров растительности является предсказание возможного отпада в конкретных древостоях на пути распространения пожара, т. е. еще до начала горения на лесном участке важно определить процент отпада деревьев при спрогнозированной интенсивности горения, данных древесной породе и среднем диаметре деревьев. Известные результаты фундаментальных пирологических исследований позволяют выполнять такой прогноз [14]. Информация о возможном отпаде в том или ином древостое поз-

волит составить оптимальный план контролирования пожара или его остановки. Прогноз вида пожара и его интенсивности будет способствовать осознанному распределению сил и средств и максимально исключит гибель пожарных, особенно в горных условиях.

Чтобы спрогнозировать поведение пожара, кроме пирологической характеристики растительности на том или ином участке территории и информации о погоде, необходимо иметь и модель распространения горения. Для прогноза распространения лесного пожара в ряде стран уже разработано более полусотни моделей [1–5, 17–23, 26, 30, 31, 34, 37, 39, 41, 46–57, 59–62 и др.]. Большинство этих моделей, как за рубежом, так и в России, создавались не лесными специалистами-пирологами, а физиками или математиками. Стремление как можно полнее описать процесс горения РГМ и учесть как можно больше факторов, влияющих на процесс горения, привело к тому, что большинство разработанных моделей в настоящее время не имеют применения в лесопожарной практике. Так, в Северной Америке из большого числа моделей в практике широко используется только одна полуэмпирическая модель Р. Ротермела [54]. В СССР предпринимались попытки адаптировать данную модель для условий распространения низовых лесных пожаров [18, 20, 21]. В настоящее время такие попытки продолжают предприниматься в России [19] и Белоруссии [3–5].

Общее, что есть у всех разработанных моделей распространения лесных пожаров, – отсутствие необходимой информационной базы, включающей прежде всего пирологическую характеристику РГМ. Поэтому сложно представить использование в практике лесного хозяйства большинства предлагаемых моделей. Единственная в России модель распространения низового лесного пожара, для которой уже созданы примеры информационных баз – это простая эмпирическая модель М.А. Софронова, опубликованная раньше американской модели Р. Ротермела [15, 31–33, 54].

В мировой практике изучения природы пожаров растительности и формирования информационных баз данных в целях прогнозирования поведения пожаров можно выделить следующие методы: выборочный, типовой и индивидуально-типовой [14].

При выборочном методе эмпирически изучается «пожарное созревание» и горение отдельных категорий участков растительности (биогеоценозов) в связи с динамичными внешними факторами: метеорологическими условиями и фенологическими периодами. Так, в 60–80 гг. XX в. в различных регионах СССР по методике проф. Н.П. Курбатского [27] проводились наблюдения в отдельных типах леса за динамикой влагосодержания и запасами напочвенного покрова и подстилки, а также за появлением возможности распространения горения в связи с погодными условиями; составлялись местные шкалы «пожарного созревания» изученных типов леса. Этот же метод применялся и в Канаде, где с помощью экспериментальных пожаров получена всесторонняя пирологическая характеристика 16 категорий участков растительности, названных «fuel types», которая используется и сейчас в этой стране [45]. Очевидно, что типов «горючих» биогеоценозов в Канаде гораздо больше. При прогнозе поведения пожара необходима пирологическая характеристика всех участков растительности вокруг пожара, но выборочный метод обеспечить ее не может.

Типовой метод используется в национальной системе (VENAVE) США. Растительность на территории страны характеризуется топливными моделями с их пирологическими характеристиками [38, 40, 44, 64]. Применение данного

метода позволяет описать с пирологической точки зрения каждый участок на территории, но характеристика очень приближенная из-за недостаточного количества топливных моделей.

В индивидуально-типовом методе отражается своеобразие каждого участка растительности. При его практическом использовании индивидуальные характеристики целесообразнее составлять из ряда типовых элементов (как это принято при таксации леса). В Институте леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН разработана методика, которая позволяет на основе имеющихся таксационных описаний и снимков высокого и сверхвысокого разрешения компоновать индивидуально-типовую пирологическую характеристику для любого участка растительности и формировать таким образом информационную базу данных для прогноза поведения пожаров [13].

Для информативного пирологического описания на участках комплексов РГМ необходима их детальная классификация. В природных условиях РГМ находятся в единстве со средой, включая почвенные условия и структуру биогеоценозов. Поэтому при классификации РГМ нельзя абстрагироваться от их природной среды, как это сделано в американской классификации [15]. В России этим требованиям наиболее удовлетворяет классификация проф. Н.П. Курбатского [28, 29], в которой учитывается распределение различных РГМ в пространстве лесного биогеоценоза, а также их роль в возникновении, распространении и развитии лесного пожара. Более детальная классификация была выполнена на основе многолетних фундаментальных пирологических исследований в разных регионах России для различных типов леса (табл. 1) [12].

Таблица 1

Классификация растительных горючих материалов

Группа РГМ	Подгруппа РГМ	Тип, подтип РГМ (их шифры)	Характер горения	Вид и разновидность пожара
I. Слои на почве из мхов, лишайников и мелких растительных остатков (основные проводники горения – ОПГ)	Мшистая	Лишайниковый (Лш)	Пм	Н-1
		Сухомшистый (Сх)	Пм	Н-1, Н-2
		Влажномшистый (Вл)	Пм и Тл	Н-2
		Болотно-моховый (Бм): подтип Бм1 подтип Бм2	Пм Негорим	Н-1
	Опадная	Травяно-ветошный (Тв)	Пм	Н-1
		Рыхлоопадный (Рх)	Пм	Н-1, Н-2
		Плотноопадный (Пл)	Пм и Тл	Н-2
		Беспроводниковый (Бп): подтип Бп1 подтип Бп2	Тл Негорим	ПТ-8,9,11
II. Подстилка, перегнойный и торфяной горизонты	Подстилка	Грубогумусная	Тл	Н-2, ПТ-8
		Модерная	Тл	Н-2, ПТ-8
		Муллея	Тл	Н-2, ПТ-8
		Дернина	Тл	ПТ-9
	Торф и перегной	Перегнойный горизонт	Тл	ПТ-10, 11
		Торфяной горизонт	Тл	ПТ-11

Окончание табл. 1

Группа РГМ	Подгруппа РГМ	Тип, подтип РГМ (их шифры)	Характер горения	Вид и разновидность пожара
III. Травяно-кустарничковые ярусы (при покрытии 0,5 и более)	Кустарничковая	Брусничный (бр)	Пм	Н
		Толокнянковый (тл)	Пс	Н
		Болотно-кустарничковый (бк)	Пм и Пс	Н
		Другие типы		
	Травяная	Злаковый (зл)	Пс	Н
		Осоковый (ос)	Пс	Н
		Осочковый (осч)	Пм	Н
	Разнотравный (рт)	Пс	Н	
IV. Крупные древесные остатки	Сухостой и валежник	Сухостой	Об, Тл	Н
		Валежник неприземленный	Об	Н
		Валежник приземленный	Об	Н
	Порубочные остатки	Охвоенные	Пм	Н-3
		Неохвоенные	Пс	Н-3
V. Ярус из кустарников и подроста	Из хвойных пород		Пм	В-6
	Из лиственных пород		Пс, Пм	Н-1,2,4
VI. Хвоя, листва, несущие побеги и сухие сучья в кронах деревьев	Из хвойных пород	Кроны в молодняках и в кедровом стланике	Пм	В-6
		Кроны в темнохвойных древостоях	Пм	В-7,6
		Кроны в светлохвойных древостоях	Пм	В-6
	Из лиственных пород	Кроны в лиственных древостоях	Пс	В-6
VII. Стволы и сучья растущих деревьев		Стволы нормальные	Об	Н
		Стволы засмоленные	Пм, Об	Н-5
		Стволы дуплистые и с трухлявой гнилью	Об, Тл	Н

Примечания. 1. Характер горения: Пм – активное пламенное; Тл – тление; Об – обгорание; Пс – пассивное сгорание. 2. Виды и разновидности пожаров: Н – низовые (в том числе беглый (1), устойчивый (2), валежниковый (3), подлесно-кустарниковый (4), стволовой (5)); В – верховые (в том числе вершинный (6), повальный (7)); ПТ – почвенно-торфяные (в том числе постилочный (8), дерновый (9), поверхностный (10), подземный (11)).

В России низовые пожары составляют до 97 % от общего числа, верховые развиваются только из низовых, почвенные, как правило, – из низовых. Поэтому важнейшим является прогноз поведения низовых пожаров, при которых возможность горения и его характеристики во многом определяются слоем гигроскопичных РГМ на поверхности почвы, его запасом, структурой и влагосодержанием. Эти РГМ названы основными проводниками горения, а закономерности их увлажнения, высыхания и горения достаточно хорошо изучены в разных регионах России, что позволило давать типам основных проводников горения характеристики, необходимые для моделирования распространения горения [12].

Такой подход упрощает формирование информационной базы в отношении пирологической характеристики растительности, поскольку главной ее частью становится характеристика типов ОПГ, которые непосредственно отражаются на картах. При этом сведения о других группах горючих материалов помещаются в табличной форме в специальном пирологическом описании (по аналогии с планом лесонасаждений и таксационным описанием к нему) [12].

Таким образом, карты РГМ являются основной частью информационной базы данных, необходимой для прогноза поведения пожаров растительности. Способы создания этих карт различаются по методам пирологической характеристики участков, прежде всего по методам определения типов ОПГ, в том числе в природных условиях.

Типы ОПГ можно оценивать не только непосредственно в лесу, пользуясь разработанным определителем [11, 16], но и косвенным методом по материалам лесоустройства, на основании таксационного описания выделов (через указанные там типы леса). Косвенный метод менее точен, но вполне приемлем для широкого применения на практике. При этом можно выделить следующие способы создания карт РГМ: 1 – автономный, 2 – в процессе лесоустройства, 3 – по материалам лесоустройства.

1. Автономный способ создания карт РГМ. Используются известные методы таксации (наземные и дистанционные), дополненные методами определения типов ОПГ непосредственно в лесу или путем дешифрирования аэро- и космоснимков высокого и сверхвысокого разрешения с помощью определителя. Данный способ хотя и имеет высокую точность, но является трудоемким и дорогостоящим. В настоящее время составлять карты РГМ таким способом целесообразно для сравнительно небольших участков территории, например, там, где запланировано проведение целевых палов, а также на площадях, прилегающих к лесным поселкам и другим важным объектам в лесу (буровые вышки, склады и др.).

2. Способ создания карт РГМ в процессе лесоустройства. На участках, где проводится наземная таксация, типы ОПГ дополнительно оцениваются по краткому определителю и отмечаются в карточке таксации. Там, где таксация выполняется методом дешифрирования снимков, используется способ дешифрирования типов ОПГ [11], сходный с методом дешифрирования типов леса. Поскольку в настоящее время при лесоустройстве (или лесоинвентаризации) применяются компьютерная обработка и хранение картографических материалов в геоинформационной системе (ГИС), карты РГМ выполняются с помощью специально разработанной программы. На практике данный способ был использован при лесоустройстве по первому разряду заповедников «Столбы», «Саяно-Шушенский», «Кузнецкий Алатау», «Убсунурская котловина» [24].

3. Способ создания карт РГМ по материалам лесоустройства. Для оценки типов ОПГ в таксационных выделах применяется косвенный метод, учитывающий связь типов ОПГ с типами леса, отмеченными в таксационном описании. Для этого составляется краткая пирологическая характеристика всех типов леса данного лесничества с использованием схемы типов леса и определителя типов ОПГ. В лесотипологических схемах нередко отсутствуют описания производных типов леса (березняков, осинников и т. д.). В таких случаях необходимо посетить несколько выделов с данными типами леса для определения типа ОПГ. При подобном способе карты РГМ также

создаются автоматизированно [24] и применяются при компьютерном прогнозировании поведения лесных пожаров [25]. На практике данный способ был реализован на примере Чунского лесничества (Красноярский край), для чего были составлены карты РГМ на территории около 1 млн га отдельно для весеннего (осеннего) и летнего периодов, поскольку территория относится к южно-таежным лесам с преобладанием травяных (злаковых) типов леса, в которых типы ОПГ изменяют свои характеристики в течение пожароопасного сезона, в отличие от северо-таежных территорий [14]. На рис. 2 и 3 приведены фрагменты карт для Чунского участкового лесничества.

Краткое пирологическое описание к карте РГМ содержит следующую информацию.

1. Древостой: указывается одна преобладающая древесная порода (элемент леса), если в составе древостоя ее участие составляет 6 и более единиц, при меньшем участии – две преобладающие породы (например, СБ). Если насаждение двухъярусное, то указываются преобладающие породы для каждого яруса через косую черту (например, Б/Е).

2. Средний диаметр: указываются средние диаметры древесных пород, отмеченных в предыдущем пункте.

3. Полнота: указывается общая относительная полнота древостоя.

4. Склон: из таксационного описания приводятся экспозиция склона (буквенное обозначение) и через косую черту – его крутизна в градусах (например, ЮВ/5, СЗ/27). Если уклон не указан, ставится прочерк.

5. Тип леса: указывается краткое обозначение типа леса с уточнением древесной породы (например, С. лш (сосняк лишайниковый)).

6. Тип ОПГ: записываются обозначения типов ОПГ для весны (осени) и лета. При этом используются схема типов леса для данного региона и определитель типов ОПГ (например, Рх/Пл (рыхлоопадный весной, плотноопадный летом)).

7. Критические классы засухи (ККЗ): для каждого типа ОПГ указываются ККЗ, в пределах которых достигается состояние «пожарной зрелости» и возможность распространения пламенного горения (например, I/III (первый (весной)/третий (летом))). В тех случаях, когда участки (выделы) расположены на крутых (круче 20°) склонах южных или северных экспозиций, вводятся разработанные поправки [12].

На основе карт РГМ и ККЗ автоматически составляется карта природной пожарной опасности, на которой красным цветом выделяются выделы, «созревшие» в пожарном отношении (готовые к распространению горения), зеленым – выделы, по которым невозможно распространение горения, желтым – выделы, находящиеся в стадии пожарного «дозревания». Для руководителя тушения пожара – это очень важная информация, позволяющая составить оптимальный план остановки пожара растительности, правильно распределить силы и средства, не рискуя жизнями людей, так как, кроме готовности участка растительности к горению, компьютерная программа рассчитывает возможность перехода низового пожара в верховой или почвенный, возможный отпад в древостое, а также необходимое количество сил и средств.

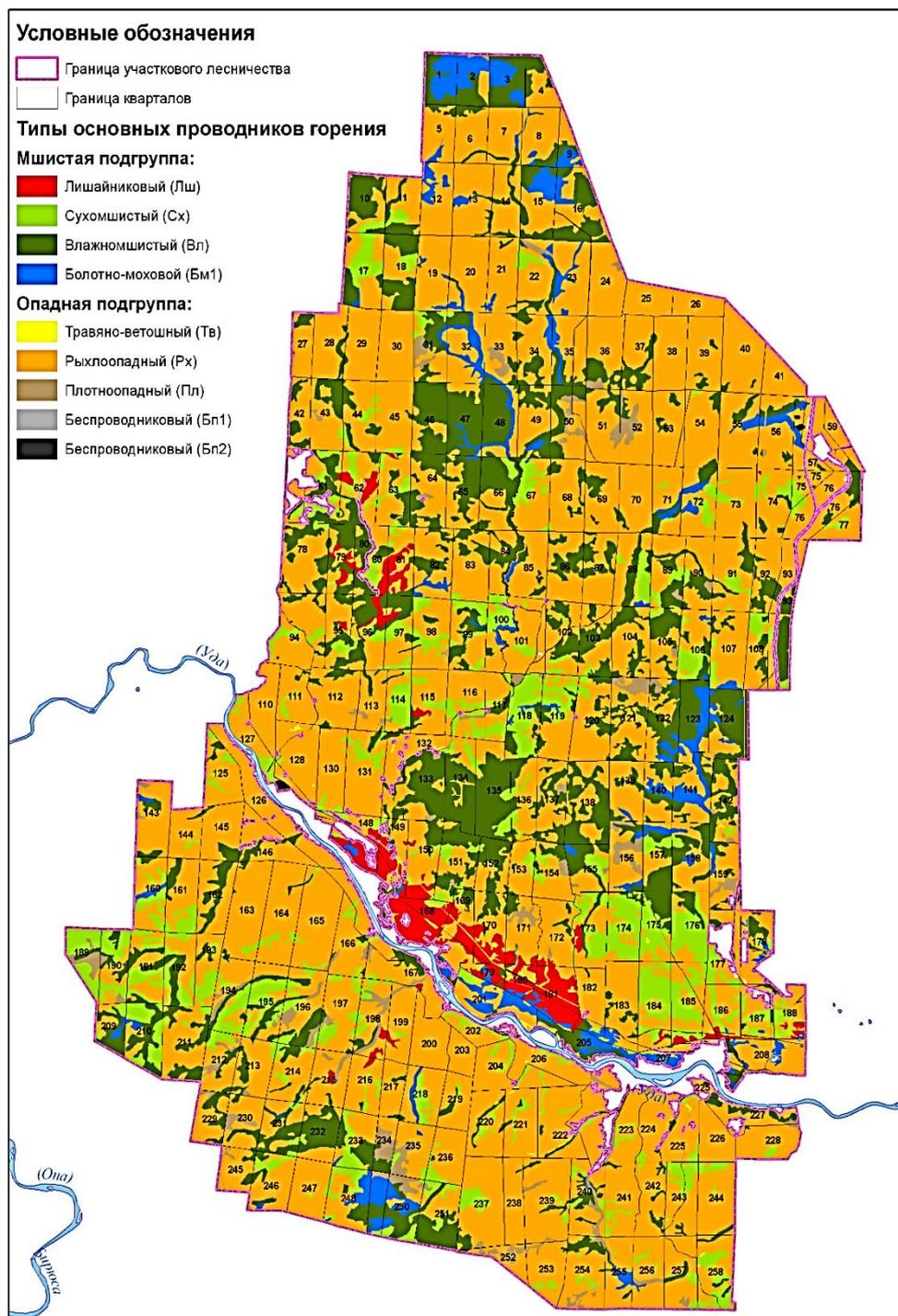


Рис. 2. Карта РГМ для весеннего (осеннего) периода (Чунское участковое лесничество, Красноярский край)

Fig. 2. Vegetation fuel map for spring (autumn) season (Chunskoye Forest District, Krasnoyarsk Krai)

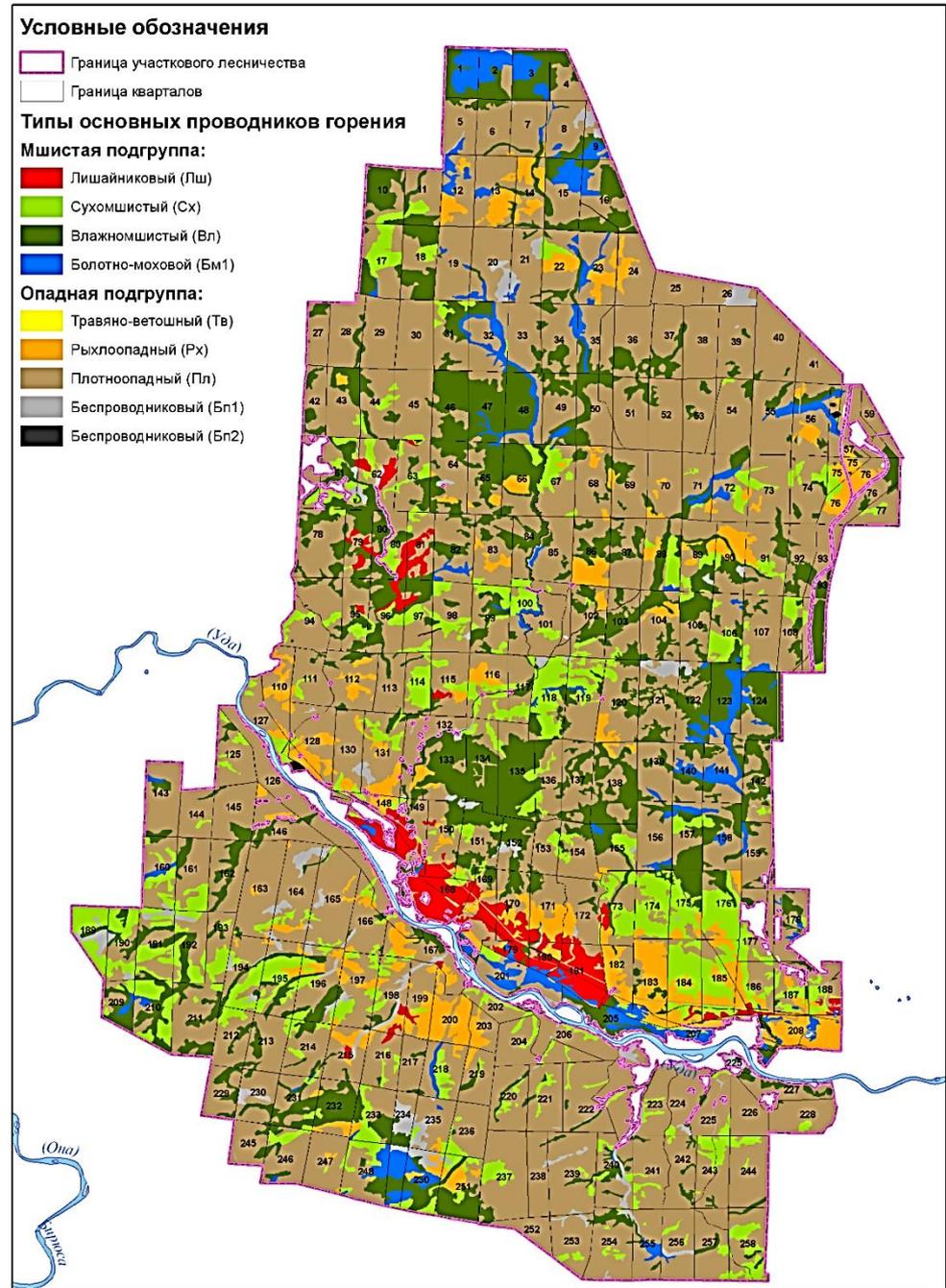


Рис. 3. Карта РГМ для летнего периода (Чунское участковое лесничество, Красноярский край)

Fig. 3. Vegetation fuel map for summer season (Chunskoye Forest District, Krasnoyarsk Krai)

На рис. 4 приведен ретроспективный анализ распространения лесного низового пожара в заповеднике «Столбы», в табл. 2 – характеристика данного пожара и оценка количества сил и средств для его тушения, рассчитанные по разработанной компьютерной программе [25].

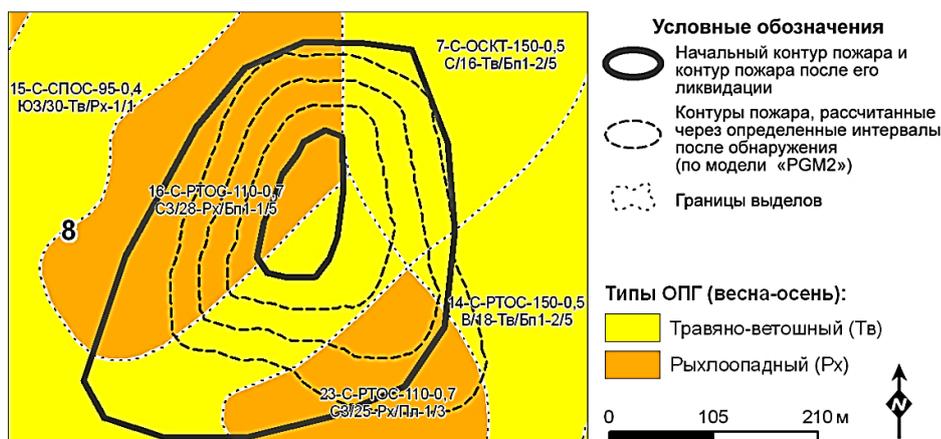


Рис. 4. Прогноз распространения лесного низового пожара, обнаруженного в заповеднике «Столбы» на площади 1 га и ликвидированного на площади 11 га (погодные условия: класс засухи – II; ветер – 2 м/с; относительная влажность воздуха – 31 %)

Fig. 4. Prediction of the spread of a forest surface fire detected in the Stolby Reserve on the area of 1 ha and eliminated on the area of 11 ha. Weather conditions: class of drought – II; wind – 2 m/s; relative air humidity – 31 %

Таблица 2

**Характеристики пожара в заповеднике «Столбы»,
рассчитанные в компьютерной программе [25]**

Характеристика	Время от начала прогноза, ч		
	1	2	3
Площадь пожара, га	2,7	5,2	8,5
Периметр пожара, м	620	870	1120
Скорость увеличения периметра, м/ч	226	260	240
Скорость увеличения площади, га/ч	2,0	2,9	3,6
Средняя скорость фронта пожара, м/ч	33	35	34
Средняя интенсивность кромки, кВт/м	112	109	107
Сила пожара	Средняя	Средняя	Средняя
Оценка количества сил и средств для тушения пожара:			
оптимальная скорость тушения, м/ч	680	780	720
продолжительность тушения, ч/площадь пожарища после тушения, га, при количестве рабочих:			
3	7,0 / 16	–	–
5	3,0 / 8,0	5,0 / 20,0	7,0 / 40,0
7	1,5 / 4,5	2,5 / 11,0	3,5 / 20,0
10	1,0 / 3,5	1,5 / 9,9	2,5 / 17,0
15	0,5 / 0,3	1,0 / 7,0	1,5 / 15,0
20	–	–	1,0 / 14,0

В целях внедрения в лесопожарную практику метода прогноза поведения пожаров растительности продолжается разработка и совершенствование обучающей компьютерной программы для подготовки руководителей тушения пожаров растительности [15].

Результаты многолетних фундаментальных пирологических исследований, включающие совершенствование оценки пожарной опасности в лесу [16],

классификацию РГМ и методы их картографирования [12], разработанные и зарегистрированные компьютерные программы пирологической характеристики таксационных выделов и скорости распространения горения при низовых пожарах [24, 25], методы разработки информационных баз данных [14], создают условия для возможности прогнозирования поведения пожаров растительности. Реальным становится создание Российской системы оценки пожарной опасности и прогноза поведения пожаров растительности, включая лесные пожары. Препятствием этому являются ведомственная разобщенность российских лесных институтов и вузов, отсутствие финансирования для внедрения в практику прикладных разработок академических институтов, недостаточное внимание уровню подготовки молодых ученых-лесопирологов и специалистов лесного хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Амосов Г.А. Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров // Возникновение лесных пожаров: сб. ст. М.: Наука, 1964. С. 152–183. [Amosov G.A. Some Patterns of Forest Ground Fires Development. *Occurrence of Forest Fires: Collection of Academic Papers*. Moscow, Nauka Publ., 1964, pp. 152–183].
2. Астафьев С.А., Лысенко Д.Ю., Широков А.С. Моделирование процесса распространения лесного пожара с применением теории перколяции // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 6. С. 70–74. [Astaf'yev S.A., Lysenko D.Yu., Shirokov A.S. Simulation of Forest Fire Spreading with the Use of the Percolation Theory. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2012, vol. 55, no. 6, pp. 70–74].
3. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров // Вестн. БГУ. Сер. 1: Физика. Математика. Информатика. 2010. № 1. С. 138–143. [Barovik D.V., Taranchuk V.B. On the Adaptation Futures of Mathematical Models of Crown Forest Fires. *Vestnik BGU. Ser. 1. Fizika. Matematika. Informatika* [Vestnik BSU. Series 1: Physics. Mathematics. Informatics], 2010, no. 1, pp. 138–143].
4. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Адаптация модели Ротермела для реализации в программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров // Технологии техносферной безопасности: интернет-журн. 2011. Вып. № 6(40). С. 1–8. [Barovik D.V., Taranchuk V.B. Rothermel's Model Adaptation for Implementation in Forest Fires Forecast Software. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technology of Technosphere Safety], 2011, no. 6(40), pp. 1–8].
5. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. 2011. № 12. С. 51–56. [Barovik D., Taranchuk V. Algorithmic Fundamentals of Computer Model for Forest Fires Prediction. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S. Fundamental'nyye nauki* [Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences], 2011, no. 12, pp. 51–56].
6. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с. [Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyuan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. *Satellite Mapping of Vegetation Cover in Russia*. Moscow, IKI RAS Publ., 2016. 208 p.].
7. Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5, т. 2. С. 419–429. [Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotelnikov R.V., Lupyuan E.A., Shchetinskiy V.E. Information System for Remote Monitoring of Forest Fires

of the Federal Forestry Agency of the Russian Federation (Current State and Development Potential). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2008, vol. 5, no. 2, pp. 419–429].

8. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е.* Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7, № 2. С. 97–105. [Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotelnikov R.V., Lupyan E.A., Tshetinskii V.E. The Main Functionalities and Structure of the Forest Fire Satellite Monitoring Information System of Russian Federal Forestry Agency (SMIS-Rosleshoz). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2010, vol. 7, no. 2, pp. 97–105].

9. *Барталев С.А., Стыценок Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А.* Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 6. С. 176–193. [Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Loupian E.A. Methodology of Post-Fire Tree Mortality Monitoring and Prediction Using Remote Sensing Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2017, vol. 14, no. 6, pp. 176–193]. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193)

10. *Волокитина А.В.* Экспериментальное изучение влияния осадков на режимы влажности и горения напочвенного покрова в целях определения и прогнозирования пожарной опасности в таежных лесах: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1980. 23 с. [Volokitina A.V. *Experimental Study of the Effect from Precipitation on the Moisture and Combustion Modes of the Ground Cover in Order to Predict Fire Hazard in Taiga Forests*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1980. 23 p.]

11. *Волокитина А.В.* Принципы разработки определителя типов основных проводников горения (на примере Красноярского Приангарья). Деп. в ВИНТИ. N5352–B90. 1990. 31 с. [Volokitina A.V. *Principles for Development of a Type Identifier of Primary Fire Carriers (On the Example of Krasnoyarsk Priangarie)*. Moscow. VINITI Publ., N5352–B90, 1990. 31 p.]

12. *Волокитина А.В., Софронов М.А.* Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 314 с. [Volokitina A.V., Sofronov M.A. *Vegetation Fuel Classification and Mapping*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2002. 314 p.]

13. *Волокитина А.В., Софронов М.А.* О формировании в процессе лесоустройства информационной базы для прогноза поведения пожаров // *Лесная таксация и лесоустройство*. 2003. № 1(32). С. 102–105. [Volokitina A.V., Sofronov M.A. On the Information Base Formation for Predicting the Behavior of Fires in the Process of Forest Management. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest valuation], 2003, no. 1(32), pp. 102–105].

14. *Волокитина А.В., Софронов М.А., Корец М.А., Софронова Т.М., Михайлова И.А.* Прогноз поведения низовых лесных пожаров. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, 2010. 211 с. [Volokitina A.V., Sofronov M.A., Korets M.A., Sofronova T.M., Mikhaylova I.A. *Forest Fire Behavior Prediction*. Krasnoyarsk, SIF SB RAS Publ., 2010. 211 p.]

15. *Волокитина А.В., Софронов М.А., Софронова Т.М.* Обучающая программа для прогноза поведения низовых лесных пожаров // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2006. № 5. С. 130–135. [Volokitina A.V., Sofronov M.A., Sofronova T.M. Teaching Programme for Predicting Behavior of Creeping Forest Fires. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2006, no. 5, pp. 130–135]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/593/593c91321a31b0123b00e991ab0af5fb.pdf>

16. *Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А.* Совершенствование оценки пожарной опасности в лесу: метод. рекомендации. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН); Краснояр. гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева, 2018. 44 с. [Volokitina A.V., Sofronova T.M.,

Korets M.A. *Improving the Assessment of Forest Fire Hazard: Instructional Guidelines*. Krasnoyarsk, SIF SB RAS Publ., 2018. 44 p.].

17. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 1981. 278 с. [Grishin A.M. *Mathematical Models of Forest Fires*. Tomsk, TGU Publ., 1981. 278 p.].

18. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с. [Grishin A.M. *Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods to Fight against Them*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 407 p.].

19. Гусев В.Г. Физико-математические модели распространения пожаров и противопожарные барьеры в сосновых лесах. СПб.: СПбНИИЛХ, 2005. 199 с. [Gusev V.G. *Physical and Mathematical Models of Fire Spreading and Fire Barriers in Pine Forests*. Saint Petersburg, SPbNIIKH Publ., 2005. 199 p.].

20. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 161 с. [Dorrer G.A. *Mathematical Models of Forest Fire Dynamics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 161 p.].

21. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с. [Dorrer G.A. *Dynamics of Forest Fires*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2008. 404 p.].

22. Доррер Г.А., Курбатский Н.П. Математические модели лесных пожаров: основные понятия, классификация, требования // Прогнозирование лесных пожаров: сб. ст. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. Сукачёва СО АН СССР, 1978. С. 5–26. [Dorrer G.A., Kurbatskiy N.P. *Mathematical Models of Forest Fires: Basic Concepts, Classification, Requirements. Prediction of Forest Fires*. Collection of Academic Papers: Krasnoyarsk, ILiD SO AN SSSR Publ., 1978, pp. 5–26].

23. Конев Э.В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. С. 99–125. [Konev E.V. *Analysis of the Spread of Forest Fires and Prescribed Burns. Thermophysics of Forest Fires*. Novosibirsk, IT SO AN SSSR Publ., 1984, pp. 99–125].

24. Корец М.А., Волокитина А.В. Программа для расчета пирологического описания лесоустраительных выделов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014660252 от 03 окт. 2014 г. Опубл. 20.11.2014 г. [Korets M.A., Volokitina A.V. *A Program for Calculating the Pyrological Description of Forest Inventory Units: Certificate of State Registration of a Computer Program on October 3, 2014, No. 2014660252*. 2014].

25. Корец М.А., Волокитина А.В. Программа для прогноза распространения низового пожара: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015661771 от 09 нояб. 2015 г. Опубл. 20.12.2015 г. [Korets M.A., Volokitina A.V. *A Program for Predicting the Spread of Surface Fire: Certificate of State Registration of a Computer Program on November 9, 2015, No. 2015661771*. 2015].

26. Коровин Г.Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров // Сборник научно-исследовательских работ по лесному хозяйству: Тр. ЛенНИИЛХ. Вып. XII. М.: Лесн. пром-сть, 1969. С. 244–262. [Korovin G.N. *The Methodology for Calculating Some Parameters of Surface Forest Fires. Collection of Scientific Research on Forestry. Proceedings of LenNIIKKh. Vol. XII*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969, pp. 244–262].

27. Курбатский Н.П. Методические указания для опытной разработки местных шкал пожарной опасности в лесах. Л.: ЦНИИЛХ, 1954. 33 с. [Kurbatskiy N.P. *Methodology Guidelines for the Pilot Development of Local Fire Danger Scales in Forests*. Leningrad, TsNIIKKh Publ., 1954. 33 p.].

28. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с. [Kurbatskiy N.P. *Technique and Tactics of Extinguishing Forest Fires*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 154 p.].

29. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО

РАН, 1970. С. 5–58. [Kurbatskiy N.P. Research of Quantity and Properties of Forest Fuels. *Issues of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk, IL SO AN SSSR Publ., 1970, pp. 5–58].

30. Софронов М.А. Влияние рельефа на лесные пожары в Западном Саяне // Лесные пожары и борьба с ними. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 127–137. [Sofronov M.A. The Terrain Effect on Forest Fires in the Western Sayan. *Forest Fires and Fighting against Them*. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, pp. 127–137].

31. Софронов М.А. Лесные пожары в горах Южной Сибири. М.: Наука, 1967. 152 с. [Sofronov M.A. *Forest Fires in the Mountains of Southern Siberia*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 152 p.].

32. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука, 1990. 205 с. [Sofronov M.A., Volokitina A.V. *Pyrological Zoning in the Taiga Zone*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 205 p.].

33. Софронов М.А., Гольдаммер И.Г.А., Волокитина А.В., Софронова Т.М. Пожарная опасность в природных условиях. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, 2005. 330 с. [Sofronov M.A., Gol'dammer I.G., Volokitina A.V., Sofronova T.M. *Fire Hazard in the Wild*. Krasnoyarsk, SIF SB RAS Publ., 2005. 330 p.].

34. Телицын Г.П. О распространении горения в лесу // Горение и пожары в лесу. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, 1973. С. 164–176. [Telitsyn G.P. On the Spread of Burning in the Forest. *Burning and Fires in the Forest*. Krasnoyarsk, IL SO AN SSSR Publ., 1973, pp. 164–176].

35. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров: утв. Гос. ком. лесн. хоз-ва Совета Министров СССР 08.08.1975. М.: ЦБНТИлесхоз, 1976. 110 с. [*Guidelines for the Detection and Extinguishing of Forest Fires: Approved by the State Forestry Committee of the Council of Ministers of the USSR on August 8, 1975*. Moscow, TsBNTIleskhoz Publ., 1976. 110 p.].

36. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров: утв. приказом Федер. службы лесн. хоз-ва России от 30.06.1995 № 100. М.: Федер. служба лесн. хоз. России, 1995. 96 с. [*Guidelines for the Detection and Extinguishing of Forest Fires: Approved by the Federal Forestry Service of Russia on June 30, 1995, No. 100*. Moscow, Federal Forestry Service of Russia Publ., 1995. 96 p.].

37. Халдина Е.А. Математическое моделирование распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных преград // Вестн. науки Сибири. 2013. № 4(10). С. 98–103. [Khaldina E.A. Mathematical Modeling of the Spread of Crown Forest Fires with Regard to Fire Barriers. *Vestnik nauki Sibiri* [Siberian Journal of Science], 2013, no. 4(10), pp. 98–103].

38. Anderson H.E. *Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior*. General Technical Report INT-122. Ogden, UT, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982. 22 p.

39. Andrews P.L., Bevins C.D., Seli R.C. *BehavePlus Fire Modeling System, Version 3.0: User's Guide*. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW. Ogden, UT, Rocky Mountain Research Station, 2005. 134 p.

40. Andrews P.L., Bevins C.D., Seli R.C. *BehavePlus Fire Modeling System, Version 4.0: User's Guide*. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW. Ogden, UT, Rocky Mountain Research Station, 2008. 116 p.

41. Barrows J.S. *Fire Behavior in the Northern Rocky Mountain Forests*. Station Paper No. 29. Missoula, MT, Northern Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1951. 103 p.

42. Burgan R.E., Rothermel R.C. *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System – FUEL Subsystem*. General Technical Report INT-167. Ogden, UT, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1984. 126 p. DOI: [10.2737/INT-GTR-167](https://doi.org/10.2737/INT-GTR-167)

43. Byram G.M. Combustion of Forest Fuels. *Forest Fire: Control and Use*. Ed. by K.P. Davis. New York, McGraw-Hill, 1959, pp. 61–89.

44. Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen J.D. *National Fire-Danger Rating System – 1978*. General Technical Report INT-GTR-39. Ogden, UT, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1977. 63 p.

45. *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*. Information Report ST-X-3. Ottawa, Science and Sustainable Development Directorate, 1992. 64 p.
46. Finney M.A. *FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4. Ogden, UT, Rocky Mountain Research Station, 1998. 47 p.
47. Finney M.A. *Efforts at Comparing Simulated and Observed Fire Growth Patterns*. Final Report 2/25/2000 INT-95066-RJVA. Missoula, MT, Systems for Environmental Management, 2000. 20 p.
48. Finney M.A. *FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4. Ogden, UT, Rocky Mountain Research Station, 1998. Revised 2004. 47 p. DOI: [10.2737/RMRS-RP-4](https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4)
49. Finney M.A., Ryan K.C. Use of the FARSITE Fire Growth Model for Fire Prediction in U.S. National Parks. *Proceedings of the International Emergency Management and Engineering Conference*. Sofia Antipolis, France, 1995, pp. 183–189.
50. Frandsen W.H., Rothermel R.C. Measuring the Energy-Release Rate of a Spreading Fire. *Combustion and Flame*, 1972, vol. 19, iss. 1, pp. 17–24. DOI: [10.1016/S0010-2180\(72\)80082-8](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(72)80082-8)
51. Keane R.E., Burgan R., van Wagtenonk J. Mapping Wildland Fuels for Fire Management across Multiple Scales: Integrating Remote Sensing, GIS, and Biophysical Modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, vol. 10(4), pp. 301–319. DOI: [10.1071/WF01028](https://doi.org/10.1071/WF01028)
52. Ottmar R.D., Burns M.F., Hall J.N., Hanson A.D. *CONSUME Users Guide*. General Technical Report PNW-GTR-304. Portland, OR, Pacific Northwest Research Station, 1993. 119 p. DOI: [10.2737/PNW-GTR-304](https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-304)
53. Reinhardt E.D., Keane R.E., Brown J.K. *First Order Fire Effects Model: FOFEM 4.0, User's Guide*. General Technical Guide INT-GTR-344. Ogden, UT, Intermountain Research Station, 1997. 65 p. DOI: [10.2737/INT-GTR-344](https://doi.org/10.2737/INT-GTR-344)
54. Rothermel R.C. *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Research Paper INT-115. Ogden, UT, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972. 40 p.
55. Rothermel R.C. *How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires*. General Technical Report INT-143. Ogden, UT, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983. 161 p. DOI: [10.2737/INT-GTR-143](https://doi.org/10.2737/INT-GTR-143)
56. Scott J.H., Burgan R.E. *Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model*. General Technical Report RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO, Rocky Mountain Research Station, 2005. 72 p. DOI: [10.2737/RMRS-GTR-153](https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153)
57. Sofronov M.A. Effect of Relief on Forest Fire in Western Sayan. *Soviet Progress in Forest Fire Control*. Ed. by N.P. Kurbatskiĭ. New York, Consultants Bureau, 1964, pp. 13–21.
58. Stocks B.J., Lynham T.J., Lawson B.D., Alexander M.E., Van Wagner C.E., McAlpine R.S., Dubé D.E. The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. *The Forestry Chronicle*, 1989, vol. 65, no. 6, pp. 450–457. DOI: [10.5558/tfc65450-6](https://doi.org/10.5558/tfc65450-6)
59. Stratton R.D. Assessing the Effectiveness of Landscape Fuel Treatments on Fire Growth and Behavior. *Journal of Forestry*, 2004, vol. 102, iss. 7, pp. 32–40. DOI: [10.1093/jof/102.7.32](https://doi.org/10.1093/jof/102.7.32)
60. Sullivan A.L. Wildland Surface Fire Spread Modelling, 1990–2007. 1: Physical and Quasi-Physical Models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, vol. 18(4), pp. 349–368. DOI: [10.1071/WF06143](https://doi.org/10.1071/WF06143)
61. Sullivan A.L. Wildland Surface Fire Spread Modelling, 1990–2007. 2: Empirical and Quasi-Empirical Models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, vol. 18(4), pp. 369–386. DOI: [10.1071/WF06142](https://doi.org/10.1071/WF06142)
62. Sullivan A.L. Wildland Surface Fire Spread Modelling, 1990–2007. 3: Simulation and Mathematical Analogue Models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, vol. 18(4), pp. 387–403. DOI: [10.1071/WF06144](https://doi.org/10.1071/WF06144)

63. Volokitina A.V. Forest Fuel Maps. *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia*, Dordrecht, Springer, 1996, pp. 239–252. DOI: [10.1007/978-94-015-8737-2_19](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8737-2_19)

64. Wright J.C. *Forest-Fire Hazard Research as Developed and Conducted at the Petawawa Forest Experiment Station*. Ottawa, Department of the Interior, 1967. 40 p.

VEGETATION FIRE BEHAVIOR PREDICTION

A.V. Volokitina¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [D-2518-2019](https://orcid.org/0000-0002-4007-6048),

ORCID: [0000-0002-4007-6048](https://orcid.org/0000-0002-4007-6048)

T.M. Sofronova², Candidate of Agriculture; ResearcherID: [B-1193-2011](https://orcid.org/0000-0002-9840-4657),

ORCID: [0000-0002-9840-4657](https://orcid.org/0000-0002-9840-4657)

M.A. Korets¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [P-9487-2015](https://orcid.org/0000-0002-5015-5874),

ORCID: [0000-0002-5015-5874](https://orcid.org/0000-0002-5015-5874)

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: volokit@ksc.krasn.ru

²Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev, ul. Ady Lebedevoy, 89, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: tmsofronova@gmail.com

The necessity for predicting the behavior of vegetation fires, including forest fires, is keenly felt in a time of severe droughts, which periodically recur in this or that area, and their precise prediction is still hampered. It is unfeasible to maintain sufficient forces and means in each region for suppressing all emerging fires. Merely the increase of technical power won't solve the problem, as evidenced by the experience of developed countries, where much attention, along with fire danger rating, has long been given to the development of a fire behavior prediction system. Such system in Russia isn't available yet, and the use of international practices seems to be impossible, since it is complicated by several factors and, above all, different historically developed approaches to the pyrological classification of vegetation and its inventory. Currently, there are all opportunities for creating the Russian system for vegetation fire behavior prediction (including forest fires): fundamental pyrological developments based on the research results of the nature of fires; a fire monitoring system has been created and is being developed; and fire danger (both natural and due to the weather conditions) rating is being improved. The article presents a principle diagram of the vegetation fire behavior prediction and considers its main components. A practical model was chosen for prediction the burning spread rate. The necessary data base for the model is available in the GIS system. Software for creation vegetation fuel (VF) maps and prediction the behavior of surface forest fires, which are up to 97 % of all occurring fires has been developed, retrospectively verified and registered. Examples of the VF maps for the Chunkskoye Forest District (Krasnoyarsk Krai) for different periods of the fire season are given. They are created based on the use of forest management information and a type identifier of primary fire carriers (i.e. the first VF group), which is directly shown in the maps. Information on the other groups of VF supporting, delaying burning or not participating in the process of burning spread, is attached to the map in the form of a pyrological description. A list of the data included in the pyrological description is given, as well as the reasons, which hold back on practical application of pyrological developments available in Russia for predicting the behavior of vegetation fires into the forest fire protection service.

For citation: Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korets M.A. Vegetation Fire Behavior Prediction. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-9-25

Keywords: vegetation fire, fire behavior, model of burning spread, information data base, program of surface fire spread prediction.

Поступила 05.04.19 / Received on April 5, 2019

УДК 582.632.1:575.858

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-26-48

КАРЕЛЬСКАЯ БЕРЕЗА: РАЗНОВИДНОСТЬ ИЛИ САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ВИД?

*Л. В. Ветчинникова*¹, *д-р биол. наук, доц., гл. науч. сотр.*; *ResearcherID: J-5665-2018*, *ORCID: 0000-0003-2091-905X*

А. Ф. Титов^{2,3}, *чл.-кор. РАН, д-р биол. наук, проф., рук. лаб., гл. науч. сотр.*; *ResearcherID: A-6705-2014*, *ORCID: 0000-0001-6880-2411*

¹Институт леса ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: vetchin@krc.karelia.ru

²Институт биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910

³Отдел комплексных научных исследований ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: titov@krc.karelia.ru

Кратко представлены сведения о том, как формировались и изменялись взгляды на таксономический статус и систематическое положение карельской березы, уникального и высокоценного представителя лесной дендрофлоры, которая в настоящее время произрастает в естественных условиях исключительно в северо-западной части континентальной Европы. На основании собственных и литературных данных и в соответствии с общепринятыми критериями вида (морфологическим, биохимическим, генетическим, репродуктивным, географическим и экологическим) проанализированы многочисленные факты и наблюдения, которые, по мнению авторов, свидетельствуют о соответствии карельской березы таксономическому рангу вида. Рассматриваются вопросы ее обособленности и родственных связей с другими представителями рода *Betula* L. Подчеркивается, что признание карельской березы в качестве самостоятельного биологического вида важно не только с научной точки зрения, но и имеет немаловажное природоохранное значение, так как существующие международные и национальные природоохранные документы и нормативно-правовые акты ориентированы на животные и растительные организмы, имеющие видовой статус.

Для цитирования: Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Карельская береза: разновидность или самостоятельный вид? // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 26–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-26-48

Финансирование: Работа осуществлялась из средств федерального бюджета в рамках выполнения государственного задания ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (Институт леса КарНЦ РАН, Институт биологии КарНЦ РАН, Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН).

Ключевые слова: карельская береза *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, таксономический статус, критерии вида, Республика Карелия.

Введение

Карельская береза, или узорчатая береза (англ. – curly birch), является уникальным аборигенным компонентом дендрофлоры Северной, Восточной, а местами – Центральной Европы. Ее высокоценная узорчатая древесина на протяжении не менее 5 столетий привлекает к себе внимание и широко применяется при изготовлении мебели, сувениров, предметов интерьера и домашнего

обихода. Считается, что свое название «карельская» она получила благодаря первым сведениям о распространении этой березы в Карелии, где местное население использовало ее из-за древесины с красивым узором.

До сих пор среди ученых-ботаников нет единого мнения о таксономическом статусе этого редкого представителя рода *Betula L.*, хотя однозначное решение данного вопроса представляет интерес не только в теоретическом, но и практическом плане. Исходя из этого, целью данной работы явилась оценка таксономического статуса карельской березы на основе важнейших общепринятых критериев вида: морфологического (анатомо-морфологического), биохимического (физиолого-биохимического), генетического (цито- и молекулярно-генетического), репродуктивного, географического и экологического. Однако сначала коротко остановимся на истории этого вопроса и попробуем понять причины существующих разногласий относительно таксономического статуса и систематического положения карельской березы.

*Изменение взглядов на таксономический статус
и систематическое положение карельской березы*

Впервые запись о карельской березе с названием «*visa*» в значении «*curly grain wood*» (узорчатая древесина) появилась в словаре финского языка в 1745 г. [70]. В России первые сведения о березе, которая «внутренностью походит на мрамор», также относятся к XVIII в., когда по приглашению Екатерины I специалист лесного дела из Германии Ф.Г. Фокель в период с 1727 по 1753 г. обследовал леса северо-запада России и подготовил книгу по лесоводству, опубликованную в 1766 г. [36, 39]. Почти сто лет спустя, в 1857 г., отечественный ученый-ботаник К.Е. Мерклин впервые предложил для карельской березы латинское название *Betula alba L. var. carelica* Mercklin, которая, по его словам, «имеет коммерческое и местное название древесины – береза карельская [30, с. 82], или карельская береза [30, с. 83], и привозится зимой из Финляндии». Как отметил Мерклин, ее свилеватая и твердая древесина идет на мелкие токарные и столярные работы. Разумеется, подобную информацию нельзя принять в качестве ботанического описания, тем не менее благодаря именно К.Е. Мерклину карельская береза получила особый таксономический статус.

Разноплановые научные исследования карельской березы были начаты лишь в XX в. Вероятно, из-за отсутствия полного описания ее отличительных особенностей систематическое положение карельской березы, предложенное К.Е. Мерклиным, утвердилось в литературе не сразу. Более того, в странах, где она встречается и/или встречалась в естественных условиях, продолжают использовать разные тривиальные названия. Например, в Финляндии карельскую березу называют «*visakoivu*» [60, 70], в Норвегии – *valbjörk* [61, 83], в Швеции – *masurbjörk*, *braun maserbirke* [67, 73, 89] и т.д.

Принятию решения о таксономическом статусе карельской березы долгое время препятствовало и то обстоятельство, что после разделения *Betula alba L.* на два вида (*B. verrucosa* Ehrh. и *B. pubescens* Ehrh.) большинство авторов стали считать карельскую березу разновидностью березы бородавчатой, хотя некоторые находили в ней внешнее сходство и с березой пушистой [25, 60, 87]. В частности, она сходна с *B. verrucosa* по форме листовой пластинки, морфологическому строению побегов, условиям местообитаний. С *B. pubescens* ее объе-

диняет наличие у обеих разных форм роста (от высокоствольной до кустообразной), а также относительно медленный рост, характер ветвления, опушенность побегов и листьев в первые годы развития растений. Финские исследователи неоднократно отмечали присутствие березы пушистой среди семян карельской березы [87]. Н.А. Пономарев (1932), П.Ф. Маевский (1933) и О.И. Кузенева (1936) рассматривали карельскую березу в качестве разновидности березы пушистой [24], а С.Н. Багаев такого рода растения описывал как «карельская береза пушистая» [3]. Тем не менее уже в конце 30-х гг. XX в. явное отличие карельской березы от обоих видов по ряду признаков, и в первую очередь по текстуре древесины, послужило основанием Н.О. Соколову – первооткрывателю карельской березы в России – для выделения ее в особую форму *B. verrucosa* Ehrh. f. *carelica* Soc., а позднее – и разновидности *B. verrucosa* Ehrh. var. *carelia* N. Sok. [38–41]. Признание карельской березы в качестве разновидности находим также в работе чешского исследователя Г. Хейтманека [59].

Однако противоречивость мнений относительно таксономического статуса карельской березы сохранялась в течение многих десятилетий. К 40-50-м гг. прошлого века в разных странах Европы усилился интерес к карельской березе и ее заново стали «открывать», давая при этом разные латинские названия с внутривидовым рангом, соответствующим форме (f.) березы бородавчатой: *B. verrucosa* Ehrh. f. *maserica* N. f. [83], *B. verrucosa* Ehrh. f. *callosa* Svoboda [90], *B. verrucosa* Ehrh. f. *carelica* Hort. [19]. Но, судя по всему, морфологические различия между березой бородавчатой и карельской березой в то время авторы сводили лишь к единственному признаку – наличию у последней узорчатой текстуры древесины.

В определении систематического положения карельской березы и установлении ее современного ботанического названия значительная роль принадлежит финским ученым. Так, в 1976 г. для карельской березы они указывали – *B. verrucosa* Ehrh. f. *carelica* Sok. [84], а с 1978 г. – *B. pendula* f. *carelica* Sok. [81,85]. Такое изменение было вызвано тем, что в 50-е гг. латинское название *B. verrucosa* Ehrh. березы бородавчатой (syn. береза повислая), согласно правилам приоритета, заменили на *B. pendula* Roth. Однако на этом изменения в ботаническом статусе карельской березы не закончились. В начале 80-х гг. в Финляндии при опубликовании библиографии по карельской березе в латинском названии ей вернули авторство К.Е. Мерклина [55]. Надо заметить, что некоторые ученые возражали против этого, указывая на обрывочность сведений в его публикации о карельской березе, и предлагали оставить автором Н.О. Соколова [17], который одним из первых подробно описал отличительные признаки карельской березы [38, 39]. В конце 80-х – начале 90-х гг. авторство К.Е. Мерклина было «узаконено» [57, 58]. К настоящему времени прочно закрепилось название «карельская береза» – *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti [11, 12, 14, 68, 70 и др.]. Согласно этому названию она является разновидностью березы повислой и в соответствии с существующей ботанической номенклатурой ее следует называть как береза повислая разновидность карельская. Для удобства изложения мы, как и другие авторы, допускаем использование ее русского тривиального названия – карельская береза.

Однако расхождение мнений относительно таксономического статуса карельской березы сохранилось до сих пор. Дело в том, что в дискуссии о систематическом положении карельской березы, которая активно велась в течение XX в., была упущена важная деталь о том, что К.Е. Мерклин [30], давая латинское название карельской березе, подчеркнул ее обособленность от других видов бере-

зы, в том числе от березы повислой и березы пушистой. Заметим, что в середине XVIII в. древовидные белокорые березы еще не разделялись и, согласно К. Линнею, считались одним видом – березой белой *Betula alba* L. Вероятно, в силу этих обстоятельств в 70-х гг. А.Я. Любавская [23, 24] неоднократно высказывалась в пользу выделения карельской березы в качестве самостоятельного вида, и такую точку зрения разделяли и другие авторы [18, 34]. Но главной причиной, которая в XX в. сдерживала решение вопроса о видовом статусе карельской березы, было отсутствие у ряда исследователей уверенности в ее генетическом происхождении и устойчивом наследовании в поколениях отличительных свойств, прежде всего узорчатой текстуры древесины, поскольку в ее потомстве встречаются особи с обычной древесиной. Однако к настоящему времени собраны многочисленные факты и аргументы, обобщенные нами в виде гипотезы эколого-генетического происхождения карельской березы [12, 92] и свидетельствующие о том, что ее появление как самостоятельной формы в процессе эволюции именно на территории северо-запада континентальной Европы было связано с серьезными природно-климатическими изменениями, которые происходили здесь в течение Малого ледникового периода (примерно между 1300 и 1850 гг. нашей эры). Наиболее вероятной его причиной считаются события, обусловленные сложным взаимодействием между атмосферой и океаном в районе Северной Атлантики, который является одним из самых климатически нестабильных в мире [93]. Разумеется, внешние условия и факторы способны дать лишь толчок и/или способствовать проявлению и закреплению определенных преимуществ у отдельных генотипов, которые могли появиться в роде *Betula* L. в результате тех или иных генетических процессов, наблюдаемых на уровне популяций и видов. Столь же важным с точки зрения вопроса о появлении карельской березы следует считать наличие здесь зон вторичной интродукции, которой на территории Фенноскандии отводится особая роль, поскольку «чистых» популяций (т.е. популяций без примеси представителей других близкородственных видов) здесь почти не осталось. Попутно заметим, что широко распространенные виды – *B. pendula* и *B. pubescens* – также не являются строго обособленными друг от друга и нередко участвуют в межвидовой гибридизации, давая в потомстве расщепление признаков [44, 50, 56]. Неслучайно при таксационной характеристике лесных насаждений, как правило, береза повислая и береза пушистая не разделяются и учитываются как единая древесная порода – береза.

Известно, что в течение длительного времени понятие «вид» в биологии основывалось прежде всего на изучении и выявлении морфологических различий между организмами [2, 26]. Но еще Е. Регель [82] относил род *Betula* L. к ряду «тех трудных родов», которые «доводили» исследователей «до отчаяния» и для которых до сих пор отсутствуют четкие диагностические критерии в определении видов в этом роде [27]. Вместе с тем развитие и все более широкое применение молекулярно-генетических методов исследований позволяют по-новому взглянуть на процессы видообразования и родственные отношения между видами в роде *Betula* [51, 62, 66, 72, 91, 94]. Добавим, что в последние годы в проблеме происхождения видов важная роль отводится интродукции [2, 75, 88, 91, 95], что, по нашему мнению, принципиально важно для понимания происхождения карельской березы [12, 92, 93].

Рассмотрим более подробно критерии вида, чтобы взглянуть на карельскую березу через их призму. Предварительно отметим, что представленные

здесь данные и суждения во многом базируются на результатах собственных исследований и наблюдений, которые были получены в ходе многолетних лабораторных работ и многочисленных экспедиций, организованных как на территории России (Республики Карелия, Башкортостан и Марий Эл; Ленинградская, Мурманская и Смоленская области), так и зарубежных стран (Дания, Швеция, Финляндия, Польша, Германия, Латвия, Литва, Республика Беларусь), причем не только в границах почти всего ареала карельской березы, но и за его пределами, в случае ее интродукции в другие регионы.

*Оценка таксономического статуса карельской березы
на основе общепринятых критериев вида*

Морфологический (анатомо-морфологический) критерий. По цвету коры, морфологии листовой пластинки и органов генеративной сферы карельская береза действительно в большей степени, по сравнению с другими видами, схожа с березой повислой. Отличительной ее чертой является узорчатая древесина с особыми физико-механическими свойствами, благодаря которой она высоко ценится на мировом рынке и в отличие от других древесных пород продается в килограммах, а не в кубических метрах. Необычное строение древесины, свойственное преимущественно ствольной части дерева, хорошо заметно на его поперечном спиле (рис. 1, а), поскольку проводящие элементы направлены не строго вертикально, а под разными углами, что приводит к образованию извилистости годичных приростов, а наличие темно-окрашенных включений обуславливает ее оригинальную цветовую гамму. У других видов березы на поперечных срезах древесины рисунок отсутствует (рис. 1, в).

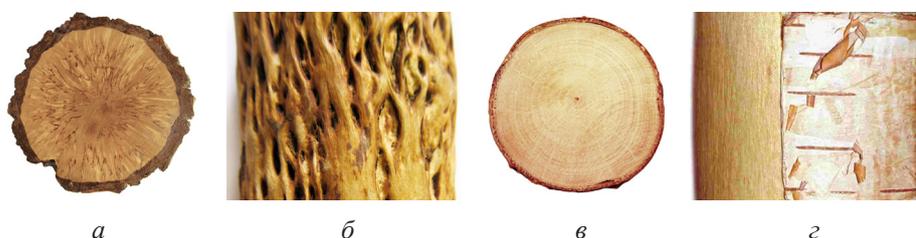


Рис. 1. Поперечные спилы (а, в) и поверхность древесины ствола после снятия коры (б, г) у карельской березы (а, б) и березы пушистой (в, г)

Fig. 1. Cross cuts (a, в) and surface of trunk wood after bark removing (б, г) from curly birch (а, б) and downy birch (в, г)

Несмотря на то, что по составу анатомических элементов древесина карельской березы также близка с древесиной берез повислой, но резко отличается по их соотношению: объем сердцевинных лучей и древесной паренхимы у карельской березы значительно больше, а длина волокнистых элементов, количество сосудов и размеры их члеников меньше (табл. 1) [1, 24, 39, 48, 83].

Более того, основу узорчатого рисунка древесины в виде темно-коричневых прожилок представляют скопления клеток паренхимной ткани. Светлые полосы появляются в местах изменения ориентации анатомических элементов, когда на поперечном срезе сосуды, сердцевинные лучи и волокнистые трахеиды располагаются в радиальной проекции и наоборот [25]. Установлено, что переход от древовидных форм роста к кустарниковым сопровождается нарастанием

паренхиматизации. Более активно паренхимные элементы взамен трахеальных откладываются в местах ослабления деятельности камбия в сторону древесины [46], причем, как правило, в тех участках ствола, которые примыкают к листовым следам и находятся в основании боковых побегов. В результате на поверхности ствола образуются визуально различимые выпуклости или утолщения, относящиеся к косвенным признакам, по которым можно диагностировать наличие узорчатой текстуры в древесине. Основными типами поверхности ствола у карельской березы являются шаровидноутолщенный, мелкобугорчатый и ребристый. Их внешний вид, как правило, отражает характер внутренней текстуры древесины. Так, шаровидноутолщенный тип свидетельствует о наличии выраженного, часто крупно-узорчатого, рисунка преимущественно в древесине утолщений и относительно слабом его проявлении или полном отсутствии в пограничных между утолщениями частях ствола. Наиболее равномерная и плотная узорчатая текстура в древесине карельской березы наблюдается у деревьев с мелкобугорчатым типом. Ребристая поверхность ствола свидетельствует о наличии слабой волнистости волокон в ее древесине [14].

Таблица 1

**Соотношение анатомических элементов
в древесине березы повислой и карельской березы [25]**

Анатомические элементы	Береза повислая	Карельская береза	
		обычная по текстуре	узорчатая
Волокнистые трахеиды, %	63,6	55,4	25,5
Сосуды, %	23,7	16,1	14,9
Сердцевинные лучи, %	10,3	21,0	45,4
Древесная паренхима, %	2,4	7,5	14,2
Длина волокнистых элементов, мк	75,0	47,6	46,6
Длина члеников сосудов, мк	53,2	36,1	28,7
Диаметр члеников сосудов, мк	5,9	4,4	3,6

Примечание. Максимальное значение показателей выделено полужирным шрифтом.

Среди признаков, прямо указывающих на наличие узорчатой текстуры в древесине, наиболее важным считается рельефная или ямчатая поверхность ствола, которая обнаруживается после удаления коры (например, в виде небольшого «окошка») (рис. 1, б). В этом случае о насыщенности узорчатой текстуры в древесине можно судить по количеству эллипсоидных углублений, вытянутых вдоль ствола. На внутренней стороне коры карельской березы имеются килевидные выступы, соответствующие форме и размерам ямок. У других видов березы поверхность древесины, как и внутренняя сторона коры, в основном ровная и гладкая (рис. 1, з).

Установлена определенная зависимость между толщиной коры и наличием рисунка в древесине карельской березы: над узорчатой древесиной кора в 3-4 раза толще по сравнению с березой повислой или березой пушистой независимо от условий и места ее произрастания [18, 39] (рис. 1, а и в). Кора у карельской березы по сравнению с другими видами березы формируется в более молодом возрасте (вследствие сильного разрастания компонентов луба и образования склерейд) и наиболее рельефно выступает в местах утолщений ствола и в основании боковых побегов.

Хорошо выраженный полиморфизм у карельской березы отмечен на всем протяжении ареала не только по типу поверхности ствола, но и по форме роста: от древовидных до кустарниковых и от одноствольных до многоствольных (последние, как правило, имеют порослевое происхождение) (рис. 2).

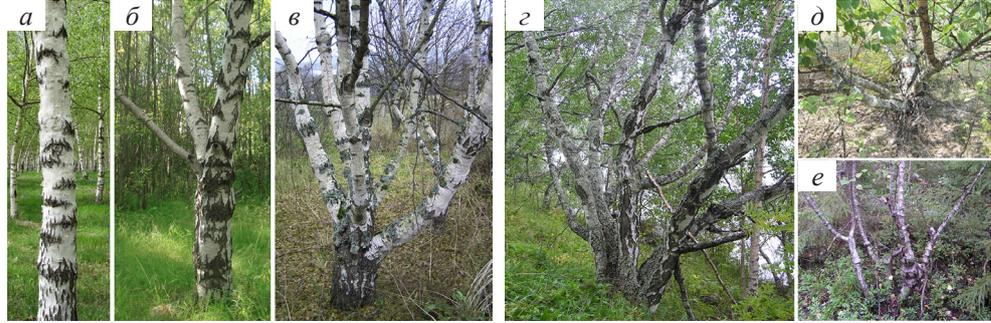


Рис. 2. Полиморфизм карельской березы по форме роста: *a* – высокоствольная; *б* – короткоствольная; *в* – кустообразная; *г* – гнездовидная (многоствольная); *д* – кустарниковая; *е* – кустовидная

Fig. 2. Polymorphism of curly birch according to the form of growth: high-stemmed (*a*), short-stemmed (*b*), shrub-like (*c*), multi-stemmed (*d*), shrubby (*d*) and fruticose (*e*)

При невысокой плотности насаждений карельской березы ведущая роль в формовом составе принадлежит короткоствольной форме роста (до 50...60%) (рис. 2, *б*). На долю деревьев высокоствольной формы (рис. 2, *а*) приходится до 10...15%, кустообразная (рис. 2, *в*) составляет примерно 25...30%, причем доля последней увеличивается по направлению к южной части ареала. Изучение генетических особенностей карельской березы с применением методов микросателлитного анализа подтвердило, что ее формовое разнообразие имеет генетическую детерминацию [7]. По внешнему виду карельская береза в отличие от березы повислой, как правило, ниже по высоте, крона у нее более редкая, «плакучесть» ветвей почти отсутствует, кора более грубая.

Обследование естественных популяций карельской березы, проведенное нами, показало, что в границах всего ее ареала встречаются деревья, возраст которых составляет 100 лет и более. Это означает, что средний возраст и общий биологический цикл развития карельской березы примерно соответствуют показателям большинства основных видов рода *Betula*, а цикл и является не столь коротким, как предполагалось ранее. Таким образом, у карельской березы основными морфологическими (анатомо-морфологическими) признаками, характеризующими ее как вид, выступают узорчатая текстура древесины (включая отличное от других видов соотношение анатомических элементов древесины и коры), а также устойчивый хорошо выраженный полиморфизм (внутривидовое разнообразие) по форме роста и типу поверхности ствола, причем независимо от условий и места ее произрастания в естественных условиях и при интродукции. Благодаря узорчатой текстуре древесины у карельской березы произошло укрепление механической функции ствола деревьев и возникла возможность накопления (а при необходимости мобилизации) большего количества запасных веществ.

Биохимический (физиолого-биохимический) критерий. Определяющая роль в формировании разных форм роста у карельской березы принадлежит симподиальному типу ветвления, которое обусловлено пониженной скоростью апикального роста осевого побега. Показано, что активное формирование

боковых почек и побегов вследствие раннего отмирания у нее верхушечной почки, в отличие от других видов березы, наблюдается уже на ранних этапах ее развития [16, 18, 35, 84]. В отдельные годы площадь листовой пластинки карельской березы может вдвое превышать аналогичный показатель у березы повислой. Изучение связанных и свободных аминокислот (табл. 2), углеводов и липидов в тканях разных видов березы показало, что основные изменения в их содержании и составе обусловлены, как правило, сменой фаз развития растений [45]. Ряд авторов в отдельные годы отмечают повышенное содержание цитокининов [49], глутаминовой кислоты [47] и отсутствие сорбитола в пасоке карельской березы [79]. Уровень содержания гетероауксина в тканях луба ветвей и ствола у карельской березы также выше, чем у березы повислой [20]. По сравнению с березой повислой и березой пушистой у карельской березы выше доля суммарных липидов в лубе ствола (в 2 раза) и ниже в бересте (на 15...20%) [10, 11]. При этом содержание диеновых жирных кислот в липидах (в основном за счет линолевой) в бересте достоверно выше. На отдельных этапах сезонного развития у растений с узорчатой текстурой по сравнению с «безузорчатыми» отмечена повышенная активность пероксидаз [15, 31]. Стоит отметить, что карельская береза и «обычные» виды (береза повислая и береза пушистая) весьма близки друг к другу, при этом по многим физиолого-биохимическим показателям она занимает промежуточное положение между ними.

Таблица 2

Динамика содержания свободных и белковых аминокислот (мг/г сухой массы), а также их соотношения в почках и листьях разных видов березы в зависимости от фенофазы [45]

Фенофаза	Береза повислая			Карельская береза			Береза пушистая		
	Аминокислоты		Белковые/ свободные	Аминокислоты		Белковые/ свободные	Аминокислоты		Белковые/ свободные
	сво- бод- ные	белко- вые		сво- бод- ные	белко- вые		сво- бод- ные	белко- вые	
Набухшие почки	5,4	249,6	46,2	<u>4,1</u>	<i>207,9</i>	<u>50,7</u>	3,9	<u>212,6</u>	54,5
Распускающиеся почки	<u>4,3</u>	400,8	93,2	4,2	<u>384,2</u>	<u>91,5</u>	5,3	382,7	72,2
Сформировавшиеся листья	0,8	192,6	240,8	<u>0,7</u>	<u>142,0</u>	<i>202,9</i>	0,6	<i>139,2</i>	232,0
Желтеющие листья	1,4	<u>130,6</u>	93,3	<u>1,1</u>	<i>106,8</i>	<u>97,1</u>	0,6	153,3	255,5
Вновь сформированные почки	2,7	112,4	<u>41,6</u>	<i>1,7</i>	<u>102,6</u>	60,4	2,7	<i>84,0</i>	<i>31,1</i>
Покоящиеся почки	2,8	114,0	<i>40,7</i>	<u>1,9</u>	<u>102,1</u>	<u>53,7</u>	1,3	<i>71,0</i>	54,6

Примечание. Максимальное значение показателей выделено полужирным шрифтом, минимальное – курсивом, средние – подчеркнуты.

Таким образом, карельская береза характеризуется значительным сходством с березой повислой и березой пушистой по многим физиолого биохимическим показателям, а выявляемые между ними различия носят преимущественно количественный характер, что указывает на их очевидную филогенетическую близость.

Генетический (цитогенетический и молекулярно-генетический) критерий. Несмотря на недостаточно полную изученность кариотипа представите-

лей рода *Betula* (из-за очень малого размера хромосом – до 2 μ), считается, что гаплоидное число хромосом для *B. pendula* Roth равняется 14, для *B. pubescens* Ehrh. – 28, их диплоидный набор – 28 и 56 хромосом соответственно [8, 42, 52]. Иначе говоря, береза повислая является диплоидом, а береза пушистая – тетраплоидом. Карельская береза представляет собой скорее диплоид с количеством хромосом, равным 28, которое, однако, может изменяться в диапазоне от 23-25 до 40-42, что свидетельствует о наличии миксоплоидии в соматических тканях узорчатых особей [8]. Несмотря на то, что явление миксоплоидии может проявляться у ряда видов древесных пород (включая березу повислую и березу пушистую), исследования показали, что у отдельных деревьев карельской березы доля триплоидных клеток ($2n = 3x = 42$) может составлять более 50%, анеуплоидных (гипо- и гипердиплоидные, например, 11 ($n - 3$) и 34 ($2n + 6$) соответственно) – около 20%, доля диплоидных ($2n = 2x = 28$) – не более 30% (рис. 3).

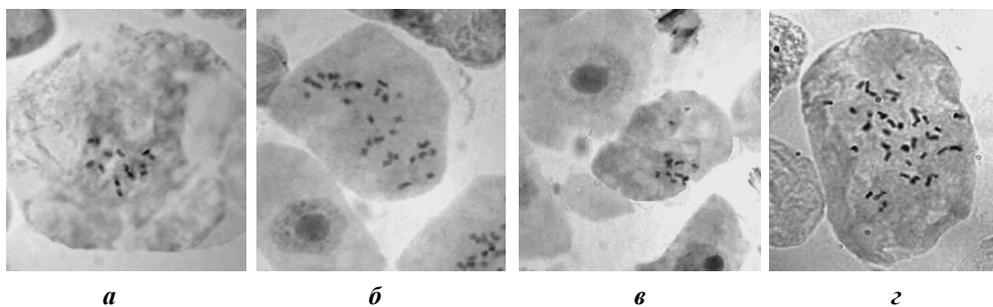


Рис. 3. Метафазные пластинки клеток листовой меристемы карельской березы с различным числом хромосом: *a* – с гаплоидным – 14 (n); *b* – модальным диплоидным – $2n = 2x = 28$; *v* и *z* – анеуплоидным – 11 ($n - 3$) и 34 ($2n + 6$) (увеличение: $10^{\times} \times 100^{\times} \times 1,5^{\times}$ [29])

Fig. 3. Metaphase plates of leaf meristem cells of curly birch with different number of chromosomes: *a* – haploid – 14 (n); *b* – modal diploid – $2n = 2x = 28$; *v* and *z* – aneuploid – 11 ($n - 3$) and 34 ($2n + 6$). Magnification: $10x, 100x, 1.5x$ [29]

По мнению А.К. Буториной [9], узорчатость в древесине формируется только в тех случаях, когда уровень миксоплоидии клеток в меристематических тканях составляет не менее 20% или даже превышает 30%. Наличие у карельской березы миксоплоидии нашло подтверждение при использовании молекулярно-генетических SSR-маркеров (Simple Sequence Repeats) [5]. При этом ее уровень по разным локусам оказался сходным и не был связан с какой-либо из хромосом. Биологическая роль и причины данного явления пока не установлены. Вместе с тем не исключено, что у карельской березы в период мейоза при микроспорогенезе и развитии мужского гаметофита причиной изменения кариотипа формируемой пыльцы может быть цитомиксис, способствующий появлению анеуплоидных гамет, а у триплоидов – формированию нередуцированной пыльцы [8]. Повышенный уровень цитомиксиса, обнаруживаемый, как правило, в результате интрогрессивной гибридизации, может быть обусловлен участием аллотетраплоидных видов [37], в случае карельской березы таким видом может выступать береза пушистая.

Следовательно, наличие миксоплоидии у карельской березы может свидетельствовать не только об ее гибридном происхождении, но и, что особенно важно для нашего анализа, об ее генетической обособленности относительно

березы повислой и березы пушистой. Однако при применении цитогенетического анализа в целях диагностики карельской березы возникают объективные сложности в подсчете хромосом из-за их мелкого размера (до 2 μ) при немалом количестве (от 14 до 56). В силу этих обстоятельств филогения и взаимоотношения видов в роде *Betula* на основе цитогенетических показателей довольно сложны, систематика чрезвычайно затруднена и, очевидно, нуждается в иных методических подходах.

Существенные различия в генетической структуре популяций карельской березы и березы повислой были обнаружены с помощью изоферментного анализа (13 ферментных систем, находящихся под контролем 20 генов) [6]. В частности, на дендрограмме, построенной методом UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean – метод попарного внутригруппового невзвешенного среднего), показано, что на территории Республики Беларусь карельская береза обособлена от березы повислой (рис. 4).

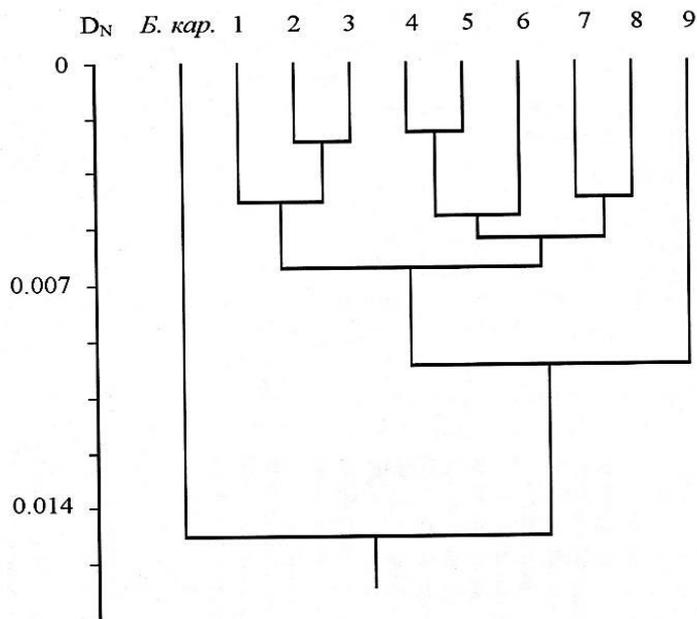


Рис. 4. Дендрограмма, отражающая степень генетического сходства между карельской березой и березой повислой, произрастающих на территории Республики Беларусь, на основании изоферментного анализа (D_N – коэффициент генетической дистанции Ней; *Б. кар.* – карельская береза; 1–9 – природные популяции березы повислой [5])

Fig. 4. Dendrogram reflecting the degree of genetic similarity between curly birch and silver birch growing on the territory of the Republic of Belarus and based on the isoenzyme analysis, where D_N – coefficient of Ney's standard genetic distance, *Б. кар.* – curly birch, 1–9 – natural populations of silver birch [5]

При этом наибольшее расхождение было выявлено по аллозимному локусу *Gpi-2* (глюкозофосфатизомеразы), у которого в популяциях березы повислой частоты аллелей 1.00 и 1.30 составляют 77,2 и 18,6% соответственно, а у березы карельской – 47,9 и 51,1% [6]. Следует добавить, что большинство деревьев карельской березы (более 90%) по данному гену находятся в гетерозиготном состоянии ($Gpi-2^{1.00/1.30}$) или гомозиготном по аллелю 1.30. У березы повислой

по этому локусу наиболее распространен генотип Gp1-2^{1.00/1.00}. Вероятность обнаружения в ее в насаждениях генотипа Gp1-2^{1.30/1.30}, по данным автора, составляет менее 5%. Высокий уровень наблюдаемой гетерозиготности по гену Gp1-2 у карельской березы свидетельствует об ее гибридном происхождении и обособленности от березы повислой.

В последние десятилетия многие исследователи для генетического картирования и оценки степени родства между популяциями и разными видами березы используют инвертированные повторы ДНК [4, 28, 54, 62, 76]. Этот метод, названный RAPD (Random Amplified Polimorphic DNA), основан на полимеразной цепной реакции PCR (Polimerase Chain Reaction). В результате ряд RAPD-локусов были предложены для использования в диагностике морфологически разных форм карельской березы или для паспортизации ее клонов [4, 28]. В последние годы для этих целей стали применяться также микросателлитные маркеры [43, 80].

Таким образом, на основании молекулярно-генетического изучения и маркирования генома карельской березы, с одной стороны, установлена ее генетическая обособленность, с другой – ее филогенетическое родство не только с березой повислой, но и с березой пушистой, что согласуется с высказанной нами эколого-генетической гипотезой происхождения карельской березы [12, 92].

Репродуктивный критерий. Карельская береза, подобно всем представителям рода *Betula*, относится к анемофильным растениям и размножается преимущественно семенами. При высокой концентрации деревьев (в том числе в специальных теплицах или при контролируемом опылении) доля растений с ярко выраженными признаками, характерными для карельской березы, как правило, резко возрастает и составляет в потомстве 90% и более. Это говорит об устойчивом наследовании узорчатости древесины при семенном размножении карельской березы и подтверждает ее обособленность от березы повислой. Но, имея гибридное происхождение, карельская береза также легко скрещивается с березой повислой и березой пушистой, как и последние между собой, несмотря на тетраплоидность березы пушистой [12, 50, 63, 92]. Подтверждением этого служат также результаты изучения степени генетической дифференциации разных видов березы, полученные с помощью молекулярно-генетических методов [7, 28, 69].

Однако межвидовая гибридизация приводит к расщеплению признаков в потомстве. Поэтому в настоящее время, когда численность популяций карельской березы значительно сократилась, при свободном опылении вероятность появления растений с узорчатой древесиной в естественных условиях крайне невелика и может составлять всего 2...3%, в лучшем случае до 25% или чуть больше.

Сравнительный анализ морфо-физиологических признаков пыльцы (размер пыльцы, длина пыльцевой трубки, фертильность, жизнеспособность) не выявил достоверных различий между карельской березой, березой повислой и березой пушистой по размеру пыльцевых зерен, тогда как у березы карликовой они были ожидаемо самыми мелкими [32, 33] (рис. 5, а). Наибольшая длина пыльцевой трубки зафиксирована у березы повислой, наименьшая – у карельской березы (рис. 5, б). Самый высокий уровень фертильности пыльцы наблюдался у березы пушистой (рис. 6, а), а самая низкая жизнеспособность – у карельской березы (рис. 6, б).

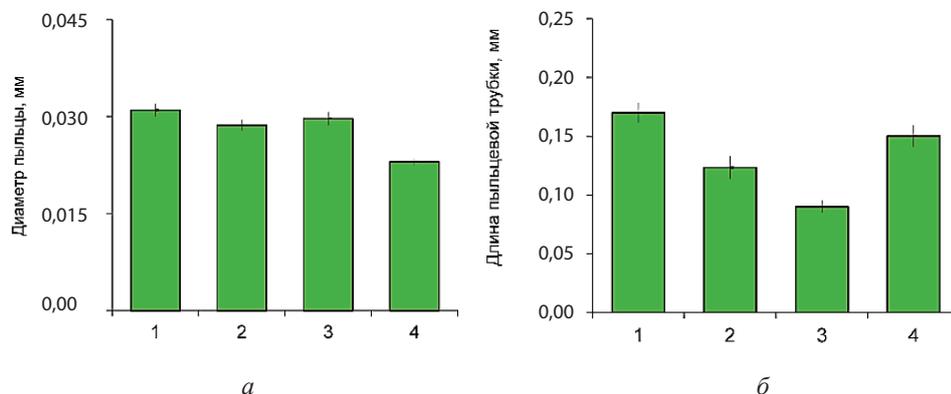


Рис. 5. Размер (диаметр) пыльцевого зерна (*a*) и длина пыльцевых трубок (*б*) у берез повислой (1), пушистой (2), карельской (3) и карликовой (4)

Fig. 5. The size (diameter) of a pollen grain (*a*) and the length of pollen tubes (*b*) of silver birch (1), downy birch (2), curly birch (3), and dwarf birch (4)

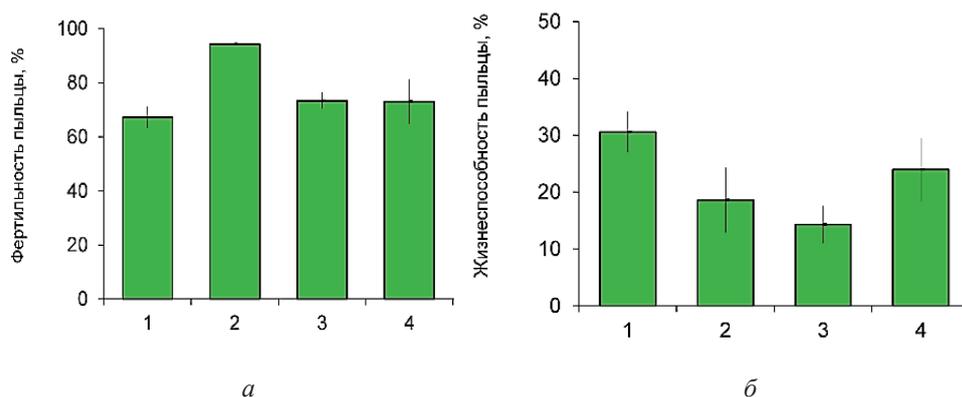


Рис. 6. Уровень фертильности (*a*) и жизнеспособности (*б*) пыльцы у берез повислой (1), пушистой (2), карельской (3) и карликовой (4)

Fig. 6. The fertility (*a*) and viability (*b*) levels of pollen of silver birch (1), downy birch (2), curly birch (3), and dwarf birch (4)

Не исключая возможного влияния экологических факторов на морфо-физиологические показатели формирующейся пыльцы, следует подчеркнуть, что наблюдаемые различия в проявлении признаков мужского гаметофита прежде всего отражают генетическое своеобразие отдельных видов березы, связанное, в частности, с их приспособленностью к условиям произрастания. По всей вероятности, эти особенности позволяют пыльце успешно конкурировать в процессах опыления и оплодотворения, и подобная способность в конечном счете направлена на поддержание на определенном уровне процессов размножения, распространения и выживания исследуемых видов в условиях конкретных местообитаний. При этом у каждого из исследованных видов в условиях анемофилии сформировались разные морфо-физиологические особенности мужского гаметофита. Например, у березы пушистой при высокой фертильности пыльцы наблюдаются низкий процент прорастания и небольшая длина

пыльцевой трубки. У березы повислой, наоборот, низкая фертильность пыльцы уравнивается высоким уровнем ее жизнеспособности и развитием удлиненной пыльцевой трубки. Свойства пыльцы карельской березы по некоторым показателям (низкая жизнеспособность и небольшая длина пыльцевой трубки) оказались хуже, чем у других видов берез. Низкий уровень жизнеспособности пыльцы карельской березы, вероятно, обусловлен цитомиксисом, при котором возрастает количество аномалий в мейозе [21]. При завершении микроспорогенеза и в ходе гаметогенеза число нарушений снижается, поэтому фертильность пыльцы карельской березы сохраняется на довольно высоком уровне.

Таким образом, можно заключить, что при семенном размножении у карельской березы наблюдается устойчивое наследование признаков узорчатой древесины. При ее совместном произрастании с березой повислой, березой пушистой или другими видами берез между ними возможна гибридизация, но только при условии устранения обычно существующей фенологической изоляции, что периодически происходит в отдельные годы. Пыльца карельской березы отличается средним уровнем фертильности, но низкой жизнеспособностью, которая, скорее всего, обусловлена цитомиксисом и генетической гетерогенностью, свойственной гибридам. Подобные морфо-физиологические особенности пыльцы карельской березы, очевидно, снижают эффективность процессов опыления, оплодотворения и вероятность получения полноценных семян, что наряду с другими факторами объясняет ограниченность ее ареала и низкий уровень естественного возобновления.

Географический критерий. Представители рода Береза (*Betula* L.), относящегося к семейству Березовые (*Betulaceae*), порядку Березоцветные (*Betulales*), распространены во всех природных зонах Северного полушария с умеренным климатом, занимая обширные территории в Европе, Азии и Америке. Ареал карельской березы, как нам представляется, сформировался в ходе длительной эволюции представителей рода *Betula* исключительно в специфических природно-климатических условиях северо-запада континентальной Европы. Он имеет четко выраженные границы, несмотря на то, что является дизъюнктивным (прерывистым) и перекрывается с ареалами березы повислой и березы пушистой. К настоящему времени в одних популяциях количество сохранившихся растений карельской березы исчисляется единицами, в других – несколькими десятками и редко сотнями, поэтому ресурсы ее весьма ограничены. Наиболее крупные ее популяции находятся на территории Республики Беларусь. В природных условиях она сохранилась в России, Швеции и Финляндии. Встречается в Норвегии, Польше, Словакии, Украине, Эстонии, Латвии, изредка – в Дании, Германии, Чехии и Литве. Очевидно, что биологические особенности карельской березы и ее внутривидовое разнообразие позволили ей закрепиться на определенных территориях, природно-климатические условия которых способствовали не только ее появлению, но и сохранению.

Экологический критерий. Как показывают исследования, на всем протяжении своего ареала карельская береза не образует лесов, произрастает одиночно или небольшими группами, как правило, изолированными друг от друга, преимущественно в хорошо освещенных местах, и поэтому чаще обнаруживается на обочинах дорог, по берегам водоемов, на опушках леса и около пастбищ. По мнению специалистов, сравнительно невысокая требовательность карельской березы к почвенным условиям позволяет ей успешно расти на бед-

ных песчаных и каменистых почвах, бывшей пашне [34, 39, 89], поскольку почвенное питание у нее, как и у большинства видов березы, осуществляется в основном за счет микоризы [14].

Тот факт, что карельская береза часто произрастает в местах, менее благоприятных для других древесных пород, объясняется ее низкой конкурентно-способностью и необходимостью поиска незанятых ниш, причем с достаточно высокой освещенностью [14, 64, 89]. Неслучайно, существует явно выраженная взаимосвязь между освещенностью и плотностью узорчатой текстуры в древесине: при ее недостатке рисунок в древесине карельской березы формируется односторонним, а не по всему диаметру. При этом изменяется и направление роста ствола: дерево становится наклонным или даже флагообразным в сторону наибольшей освещенности. Установлено, что при высокой плотности насаждений высокоствольные формы роста карельской березы до появления признаков узорчатости растут интенсивно и не уступают по высоте березе повислой [14, 17]. Но через 10-15 лет, по мере формирования узорчатой древесины, они снижают темпы роста и переходят в подчиненный ярус, поскольку наблюдается смыкание крон растущих рядом безузорчатых особей. По мере затенения постепенно прекращается и формирование узорчатой текстуры в древесине. Деревья короткоствольной и кустообразной форм роста к этому времени не выдерживают конкуренции с более быстрорастущими лиственными породами и, как правило, находятся в угнетенном состоянии или отмирают.

Накопленные сведения об условиях произрастания карельской березы опровергают мнение о ее приуроченности к определенному типу почв. На плодородных почвах она также хорошо растет и развивается, но только при условии отсутствия конкуренции с другими древесными породами.

Таким образом, можно заключить, что карельская береза занимает вполне определенную экологическую нишу и характеризуется особым отношением к среде обитания, а также низкой конкурентоспособностью по сравнению с другими древесными породами, прежде всего сопутствующими.

Заключение

Биологические особенности карельской березы – уникальные анатомо-морфологические свойства древесины; хорошо выраженный полиморфизм по форме роста и типу поверхности ствола; наличие определенной экологической ниши и локальный, но четко выраженный дизъюнктивный ареал; наличие миксоплоидии и цитомиксиса, свойственных гибридам, а главное устойчивое наследование при семенном размножении признаков узорчатой текстуры древесины, указывают на ее очевидную генетическую обособленность и, как следует из анализа собственных данных и литературы, на соответствие общепринятым критериям вида.

Вполне очевидно, что географическая приуроченность является отражением особого направления в эволюции рода *Betula* L., в результате которого у карельской березы сформировался и закрепился качественно новый морфотип, обеспечивший ей собственные способы и механизмы приспособления к вполне определенным местообитаниям. Так, хорошо выраженный полиморфизм жизненных форм (от деревьев до кустарников), наряду с другими особенностями, позволяет ей нормально расти и развиваться в разных экологических условиях

и местообитаниях, включая те, которые малопригодны для других древесных видов. В результате образования склерид в тканях флоэмы и ксилемы у карельской березы происходит усиление механической функции ствола. Укороченные размеры члеников сосудов обеспечивают ускоренную мобилизацию пластических веществ между лучами, сосудами и волокнистыми трахеидами, а активное развитие паренхимной ткани способствует депонированию метаболитов и их более рациональному использованию при ухудшении внешних условий.

Однако следует отметить, что в последние десятилетия в связи с активным развитием филогеографии обозначился определенный поворот от биологической концепции вида в сторону филогенетической и от типологической концепции таксона к популяционной. В связи с этим в филогении и таксономии все шире используются молекулярно-генетические методы (например, сравнительный анализ нуклеотидных последовательностей ядерной и хлоропластной ДНК). Разработан также ряд подходов видоидентификации растений, включающий наряду с классическими методами секвенирование таксономически значимых районов ДНК. Интересно, что на основании анализа хлоропластной, а затем и ядерной ДНК [65, 74, 77, 78, 94, 96] для березы повислой, произрастающей в Европе, установлено существование двух предковых популяций, условно разделенных на европейские и азиатские (с наличием зон вторичной интрогрессии на территории Финляндии) [86], что говорит о весьма вероятном их происхождении от общего предка. Не исключено, что это отражает аллопатрическое образование и разделение видов во время последнего ледникового периода и их воссоединение после отступления ледника, как было показано ранее на основании изучения хлоропластной ДНК [71]. Так, одним из предков аллотетраплоидного вида березы пушистой в филогении считается береза повислая. Нами на основании молекулярного маркирования генома карельской березы и изучения ряда физиолого-биохимических показателей также показана ее филогенетическая близость как с березой повислой, так и с березой пушистой [14].

Отметим и то, что необходимо разделять понятие внутривидовой изменчивости (которая отражает степень вариабельности тех или иных признаков у данного вида, является обычным явлением и способствует поддержанию устойчивости и целостности вида в изменяющихся условиях внешней среды) и видообразование, которое чаще всего становится следствием достаточно крупных реорганизаций генома [2]. Поэтому для признания видового статуса крайне важно привлекать не только данные филогеографии, но и других биологических дисциплин – ботаники, физиологии, биохимии, цитогенетики, популяционной генетики и экологии. И если следовать такому более широкому (комплексному) подходу, то кажется вполне закономерным вывод, к которому мы пришли, а именно о необходимости пересмотра таксономического ранга карельской березы и выделения ее в качестве самостоятельного биологического вида. Разумеется, только после широкого обсуждения данного вопроса, и прежде всего со специалистами в области систематики.

Следует сказать и о том, что нерешенность данного вопроса может порождать определенные негативные последствия. Дело в том, что в результате активного хозяйственного использования карельской березы (в качестве источника высокоценной древесины) в последние 50-70 лет в природных популяциях отмечено резкое сокращение ее численности, вплоть до полного исчезновения на территории отдельных стран и регионов [13]. Дополнительно

усугубляет ситуацию то обстоятельство, что на всем протяжении ареала у нее фактически отсутствует жизнеспособный подрост. Поэтому нельзя исключить, что следствием этого в перспективе может стать полное исчезновение карельской березы, т. е. утрата одного из наиболее уникальных представителей лесной дендрофлоры Европы. В случае же признания карельской березы в качестве самостоятельного биологического вида она может получить официальный статус краснокнижного объекта, поскольку существующие ныне международные и национальные природоохранные документы, и нормативно-правовые акты ориентированы на животные и растительные организмы, имеющие видовой статус [53]. Добавим, что согласно требованиям, установленным к категории редкости видов (Красная книга России) и степени угрозы (Международный союз охраны природы – International Union for Conservation of Nature and Natural Resources), карельская береза в одной из красных книг регионального уровня [22] уже отнесена к категории 2/ЕН (где 2 – сокращающиеся в численности виды, а ЕН – Endangered – находящиеся в опасном состоянии (исчезающие) виды). Однако из-за отсутствия таксономического ранга, соответствующего виду, в красные книги международного и национального уровней она не включена, что делает карельскую березу более уязвимой, а задачу сохранения ее генофонда и восстановления численности трудно решаемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Алексеева А. И. Диагностические признаки древесины карельской березы // Изв. вузов. Лесн. журн. 1962. №3. С. 33-37. [Alekseyeva A. I. Diagnostic Signs of Curly Birch Wood. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1962, no. 3, pp. 33–37]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1962.pdf>
2. Алтухов Ю. П. Вид и видообразование // Сорос. образоват. журнал. 1997. №4. С. 2-10. [Altukhov Yu. P. Species and Speciation. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1997, no. 4, pp. 2–10].
3. Багаев С. Н. Карельская и капокорешковая береза в лесах Костромской области // Лесн. хоз-во. 1963. №6. С. 20-22. [Bagayev S. N. Karelian and Burr-Root Birch in the Forests of Kostroma Region. *Lesnoye khozyaystvo*, 1963, no. 6, pp. 20–22].
4. Баранов О. Ю. Популяционно-генетическая структура представителей рода *Betula* L. на территории Беларуси и ее использование в лесной селекции: автореф. дис.... канд. биол. наук. Гомель, 2003. 24 с. [Baranov O. Yu. *The Population and Genetic Structure of Representatives of the Genus Betula L. in Belarus, and Its Application in Forest Selection: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Gomel*, 2003. 24 p.].
5. Баранов О. Ю., Балюцкас В. Использование молекулярно-генетических маркеров для анализа плоидности осины и березы // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Вып. 69. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2009. С. 129–135. [Baranov O. Yu., Balyutskas V. M. Using Molecular Genetic Markers for Analysis of Aspen and Birch Ploidy. *Issues of Forest Science and Forestry: Collection of Academic Papers*. Gomel, IL NaN of Belarus Publ., 2009, iss. 69, pp. 129-135].
6. Баранов О. Ю., Марковская Ю. А. Особенности генетической структуры березы карельской по гену *Gpi-2* // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Вып. 50. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2003. С. 181–185. [Baranov O. Yu., Markovskaya Yu. A. Features of Genetic Structure of Curly Birch by *Gpi-2* Gene. *Issues of Forest Science and Forestry: Collection of Academic Papers*. Gomel, IL NaN of Belarus Publ., 2003, iss. 50, pp. 181–185].
7. Баранов О. Ю., Николаева Н. Н., Машкина О. С., Балюцкас В. М. Филогенетический анализ березы карельской на основании данных секвенирования гена ал-

когольдегидрогеназы // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды: материалы междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 24–29. [Baranov O. Yu., Nikolayeva N. N., Mashkina O. S., Balyutskas V. M. Phylogenetic Analysis of Curly Birch Based on Alcohol Dehydrogenase Gene Sequencing Data. *Structural and Functional Abnormalities of Growth and Development of Plants under the Influence of Environmental Factors: Proceedings of the International Conference*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2011, pp. 24–29].

8. Буторина А. К. Цитогенетика хозяйственно-ценных форм карельской березы // Генетика. 1985. Т. 21, № 7. С. 1192–1198. [Butorina A. K. Cytogenetics of Economically Valuable Forms of Curly Birch. *Genetika* [Soviet Genetics], 1985, vol. 21, no. 7, pp. 1192–1198].

9. Буторина А. К. О природе узорчатости древесины у карельской березы // Генетические и экологические основы повышения продуктивности лесов: сб. науч. тр. Воронеж: НИИЛГиС. 1993. С. 40–47. [Butorina A. K. On the Nature of Curly Birch Wood Veins. *Genetic and Ecological Principles of Forest Productivisation: Collection of Academic Papers*. Voronezh, NIILGiS Publ., 1993, pp. 40–47].

10. Ветчинникова Л. В. Береза: вопросы изменчивости (морфо-физиологические и биохимические аспекты). М.: Наука, 2004. 183 с. [Vetchinnikova L. V. *Birch: Variability Problems (Morpho-Physiological and Biochemical Aspects)*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 183 p.].

11. Ветчинникова Л. В. Карельская береза и другие редкие представители рода *Betula* L. М.: Наука, 2005. 269 с. [Vetchinnikova L. V. *Karelian Birch and Other Rare Representatives of the Genus Betula* L. Moscow, Nauka Publ., 2005. 269 p.].

12. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Происхождение карельской березы: эколого-генетическая гипотеза // Экологическая генетика. 2016. Т. 14, № 2. С. 3–18. DOI: [10.17816/ecogen1423-18](https://doi.org/10.17816/ecogen1423-18) [Vetchinnikova L. V., Titov A. F. The Origin of the Karelian Birch: An Ecogenetic Hypothesis. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*, 2017, vol. 7, iss. 6, pp. 665–677]. DOI: [10.1134/S2079059717060144](https://doi.org/10.1134/S2079059717060144)

13. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Карельская береза в заказниках Республики Карелия: история, современное состояние и проблемы // Ботан. журн. 2018. Т. 103, № 2. С. 256–265. [Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Karelian Birch in Sanctuaries in the Republic of Karelia: History, Current State, Problems. *Botanicheskii Zhurnal* [Botanical journal], 2018, vol. 103, no. 2, pp. 256–265]. DOI: [10.1134/S0006813618020096](https://doi.org/10.1134/S0006813618020096)

14. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф., Кузнецова Т. Ю. Карельская береза: биологические особенности, динамика ресурсов и воспроизводство. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 312 с. [Vetchinnikova L., Titov A., Kuznetsova T. Curly Birch: *Biological Characteristics, Resource Dynamics, and Reproduction*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2013. 312 p.].

15. Галибина Н. А., Мошкина Е. В., Никерова К. М., Мощенская Ю. Л., Знаменский С. Р. Активность пероксидазы как индикатор степени узорчатости древесины карельской березы // Лесоведение. 2016. № 4. С. 294–304. [Galibina N. A., Moshkina E. V., Nikerova K. M., Moshchenskaya Yu. L., Znamenskii S. R. Peroxydase Activity Indicates Veining of Curly Birch. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2016, no 4, pp. 294–304].

16. Ганюшкина Л. Г. Характеристика некоторых физиологических показателей березы карельской // Пути адаптации организмов в условиях Севера. Петрозаводск: Петрозавод. гос. ун-т, 1978. С. 28–29. [Ganyushkina L. G. Description of Some Physiological Parameters of Curly Birch. *Ways of Adaptation of Organisms in the North*. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 1978, pp. 28–29].

17. Евдокимов А. П. Биология и культура карельской березы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 228 с. [Evdokimov A. P. *Biology and Crop of Curly Birch*. Leningrad, LSU Publ., 1989. 228 p.].

18. Ермаков В. И. Механизмы адаптации березы к условиям Севера. Л.: Наука. 1986. 144 с. [Ermakov V. I. *Mechanisms of Birch Adaptation to the North Conditions*. Leningrad, Nauka Publ., 1986. 144 p.].

19. Качалов А.А. Деревья и кустарники. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 408 с. [Kachalov A.A. *Trees and Shrubs*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970. 408 p.].
20. Косиченко Н.Е., Щетинкин С.В. Структурные аспекты дифференциации и диагностики узорчатости древесины березы карельской // Современные аспекты древесиноведения: тез. докл. всесоюз. конф. (22–24 сент. 1987 г.). Красноярск: ИЛИД, 1987. С. 27–29. [Kosichenko N.E., Shchetinkin S.V. Structural Aspects of Differentiation and Diagnosis of Wood Veins in Curly Birch. *Modern Aspects of Wood Science: Abstracts of the All-Union Conference* (September 22–24, 1987). Krasnoyarsk, ILID Publ., 1987, pp. 27–29].
21. Кравец Е.А. Цитомиксис и его роль в регуляции фертильности растений // Онтогенез. 2013. Т. 44, №3. С. 147–165. [Kravets E.A. Cytomixis and Its Role in the Regulation of Plant Fertility. *Ontogenez* [Russian Journal of Developmental Biology], 2013, vol. 44, no. 3, pp. 147–165]. DOI: [10.7868/S0475145013030038](https://doi.org/10.7868/S0475145013030038)
22. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 368 с. [*Red Book of the Republic of Karelia*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 2007. 368 p.].
23. Любавская А.Я. Селекция и интродукция карельской березы: автореф.... д-ра с.-х. наук. М., 1969. 48 с. [Lyubavskaya A. Ya. *Selection and Introduction of Karelian Birch*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1969. 48 p.].
24. Любавская А.Я. Карельская береза и ее место в системе рода *Betula* // Закономерности внутривидовой изменчивости лиственных древесных пород: сб. ст. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. С. 53–59. [Lyubavskaya A. Ya. Karelian Birch and Its Place in the System of the Genus *Betula*. *Regularities of Intraspecific Variability of Hardwood Species: Collection of Academic Papers*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1975, pp. 111–114].
25. Любавская А.Я. Карельская береза. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 158 с. [Lyubavskaya A. Ya. *Karelian Birch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 158 p.].
26. Майр Э. Популяции, виды и эволюция. М.: Мир, 1974. 460 с. [Mayr E. *Populations, Species, and Evolution*. Moscow, Mir Publ., 1974. 460 p.].
27. Маслов А.А., Баранов О.Ю., Сирин А.А. Идентификация видов берез в заболоченных лесах центра Русской равнины по результатам молекулярно-генетического анализа // Лесоведение. 2019. №3. С. 177–187. [Maslov A.A., Baranov O. Yu., Sirin A.A. A Molecular Genetics Study of Silver and Downy Birches in Peatland and Paludified Forest Types in the Middle of the East European Plain. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 3, pp. 177–187]. DOI: [10.1134/S0024114819020062](https://doi.org/10.1134/S0024114819020062)
28. Матвеева Т.В., Машкина О.С., Исаков Ю.Н., Лутова Л.А. Молекулярная паспортизация клонов карельской березы при помощи ПЦР с полуслучайными праймерами // Экологическая генетика. 2008. Т. 6, №3. С. 18–23. [Matveeva T. V., Mashkina O.S., Isakov Y. N., Lutova L. A. Molecular Passportization of Clones of Karelian Birch Using PCR with Semi-Specific Primers. *Ekologicheskaya genetika* [Ecological genetics], 2008, vol. 6, no. 3, pp. 18–23].
29. Машкина О.С., Буторина А.К., Табацкая Т.М. Карельская береза (*Betula pendula* Roth var. *carelica* Merkl.) как модель для изучения генетической и эпигенетической изменчивости при формировании узорчатой древесины // Генетика. 2011. Т. 47, №8. С. 1073–1080. [Mashkina O. S., Butorina A. K., Tabatskaya T. M. Karelian Birch (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* Merkl.) as a Model for Studying Genetic and Epigenetic Variation Related to the Formation of Patterned Wood. *Genetika* [Russian Journal of Genetics], 2011, vol. 47, no. 8, pp. 1073–1080]. DOI: [10.1134/S1022795411080126](https://doi.org/10.1134/S1022795411080126)
30. Мерклин К. Анатомія коры и древесины стебля разных лѣсныхъ деревъ и кустарниковъ Россіи. Санкт Петербургъ: Типографія Якова Трея, 1857. 101 с. [Merklin K. *Anatomy of Bark and Stem Wood of Different Forest Trees and Shrubs in Russia*. Saint Petersburg, Tipografiya Yakova Treya, 1857. 101 p.].
31. Никерова К.М., Галибина Н.А., Мощенская Ю.Л., Новицкая Л.Л., Подгорная М.Н., Софронова И.Н. Участие каталазы и пероксидазы в процессах ксилогенеза у карельской березы // Лесоведение. 2019. №2. С. 115–127. [Nikerova K. M., Galibina N. A.,

Moshchenskaya Yu. L., Novitskaya L. L., Podgornaya M. N., Sofronova I. N. Contribution of Catalase and Peroxidase to Xylogenesis of Karelian Birch. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 2, pp. 115–127]. DOI: [10.1134/S0024114819020086](https://doi.org/10.1134/S0024114819020086)

32. Николаевская Т.С., Ветчинникова Л.В., Лебедева О.Н., Кузнецова Т.Ю. Морфофизиологическая характеристика пыльцы различных видов березы в условиях Восточной Фенноскандии // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Биogeография, вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 84–91. [Nikolaevskaya T.S., Vetchinnikova L.V., Lebedeva O.N., Kuznetsova T.Yu. Morphophysiological Characteristics of Pollen of Various Birch Species in Eastern Fennoscandia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Biogeografiya* [Transactions of the Karelian Research Centre of RAS. Series: Biogeography], 2008, iss. 14, pp. 84–91].

33. Николаевская Т.С., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Лебедева О.Н. Изучение пыльцы у аборигенных и интродуцированных в условия Карелии представителей рода *Betula* L. // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Биogeография, вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. №4. С. 90–95. [Nikolaevskaya T.S., Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Lebedeva O.N. Study of Pollen in Native and Introduced *Betula* Species in Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Biogeografiya* [Transactions of the Karelian Research Centre of RAS. Series: Biogeography], 2009, iss. 4, pp. 90–95].

34. Побирушко В.Ф. Распространение и изменчивость березы карельской в Беларуси // Ботаника: сб. науч. тр. Минск: Наука і тэхніка, 1992. Вып. 31. С. 31–39. [Pobirushko V.F. Distribution and Variability of Karelian Birch in Belarus. *Botany: Collection of Academic Papers*. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1992, iss. 31, pp. 31–39].

35. Погиба С.П. Полиморфизм жизненных форм карельской березы в свете теории соматической эволюции // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды: материалы международ. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 245–249. [Pogiba S.P. Polymorphism of Vital Forms of Karelian Birch in the Context of the Theory of Somatic Evolution. *Structural and Functional Abnormalities of Growth and Development of Plants under the Influence of Environmental Factors. Proceedings of the International Conference*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2011, pp. 245–249].

36. Редько Г.И. Лесной знатель Ф.Г. Фокель в России // Изв. вузов. Лесн. журн. 1990. №5. С. 129–131. [Red'ko G.I. Forest Expert F.G. Fokel' in Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1990, no. 5, p. 129–131]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1990/1990%20№%205.pdf>

37. Сидорчук Ю.В., Дейнеко Е.В., Шумный В.К. Особенности цитомиксиса в материнских клетках пыльцы у трансгенных растений табака *Nicotiana tabacum* L. с мутантным фенотипом // Цитология. 2007. Т. 49, №10. С. 870–875. [Sidorchuk Yu.V., Deineko E.V., Shumny V.K. Peculiarities of the Cytomixis in the Pollen Mother Cells of Transgenic Tobacco Plants (*Nicotiana tabacum* L.) with Mutant Phenotype. *Tsitologiya* [Cell Tissue and Biology], 2007, vol. 49, no. 10, pp. 870–875].

38. Соколов Н.О. Карельская береза // Тр. ЛТА. 1938. Вып. 53. С. 87–96. [Sokolov N.O. Karelian Birch. *Trudy LTA*, 1938, iss. 53, pp. 87–96].

39. Соколов Н.О. Карельская береза. Петрозаводск: Гос. изд-во Карело-Фин. ССР, 1950. 116 с. [Sokolov N.O. *Karelian Birch*. Petrozavodsk, Gosudarstvennoye izdatelstvo Karelo-Finskoy SSR, 1950. 116 p.].

40. Соколов Н.О. Задачи дальнейшего изучения карельской березы // Изв. Карельского и Кольского филиалов АН СССР. 1958. №3. С. 96–102. [Sokolov N.O. Tasks of the Further Study of Karelian Birch. *Izvestiya Karel'skogo i Kol'skogo filialov AN SSSR*, 1958, no. 3, pp. 96–102].

41. Соколов Н.О. Отбор карельской березы в лесах и культурах Северо-Запада // Закономерности внутривидовой изменчивости лиственных древесных пород: сб. ст. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. С. 111–114. [Sokolov N.O. Selection of Karelian Birch in Forests and Plantations of the North-West. *Regularities of Intraspecific Variability*

of *Hardwood Species: Collection of Academic Papers*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1975, pp. 111–114].

42. Соловьева Н.М. К кариологическому изучению берез // Бюл. Глав. ботан. сада. 1977. №106. С. 100–103. [Solov'yeva N.M. To the Caryological Study of Birches. *Bulleten` Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1977, no. 106, pp. 100–103].

43. Федулова Т.П., Исаков Ю.Н., Корчагин О.М., Исаков И.Ю., Кондратьева А.М., Ржевский С.Г. Молекулярно-генетическая дифференциация генотипов березы на основе полиморфизма SSR-маркеров // Лесотехн. журн. 2017. №4. С. 6–16. [Fedulova T.P., Isakov Y.N., Korchagin O.M., Isakov I. Y., Kondratyeva A.M., Rzhavskiy S.G. Molecular-Genetic Differentiation of Genotypes of Birch Based on SSR-Markers Polymorphism. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2017, vol. 7, no. 4, pp. 6–16]. DOI: [10.12737/article_5a3cef5a94cab2_12952001](https://doi.org/10.12737/article_5a3cef5a94cab2_12952001)

44. Цвелев Н.Н. О родах *Betula* L. и *Alnus* Mill (Betulaceae) в Восточной Европе //Новости систематики высших растений. 2002. Т. 34. С. 47–73. [Tsvelev N.N. On the Genera *Betula* L. and *Alnus* Mill (Betulaceae) in Eastern Europe. *Novosti sistematiki vysshikh rasteniy* [Novitates Systematicae Plantarum Vascularium], 2002, iss. 34, pp. 47–73].

45. Шуляковская Т.А., Ветчинникова Л.В., Репин А.В., Шредерс С.М. Динамика содержания аминокислот в почках и листьях *Betula pubescens* и *B. pendula* (Betulaceae) в течение вегетационного периода // Растит. ресурсы. 2007. Т. 43, №4. С. 87–94. [Shulyakovskaya T. A., Vetchinkikova L. V., Repin A. V., Schreders S. M. Dynamics of Amino Acid Content in Buds and Leaves of *Betula pubescens* and *B. pendula* (Betulaceae) during the Vegetation Period. *Rastitelnye Resursy*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 87–94].

46. Щетинкин С.В. Гистогенез узорчатой древесины березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* Merkl. и *Betula pendula* Roth: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 1988. 24 с. [Shchetinkin S.V. *Histogenesis of Veined Wood in Betula pendula* Roth var. *carelica* Mercl. and *Betula pendula* Roth: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 1988. 24 p.].

47. Эглите Г.К., Ошкая В.П. Свободные аминокислоты карельской березы // Изв. АН Латв. ССР. 1973. №1. С. 15–20. [Egļite G.K., Oshkaya V.P. Free Amino Acids in Karelian Birch. *Izvechtiya AN Latvīyskoy SSR*, 1973, no. 1, pp. 15–20].

48. Яковлев Ф.С. Анатомическое строение ствола карельской березы // Изв. Карело-Фин. науч.-исслед. базы АН СССР. 1949. №1. С. 3–19. [Yakovlev F.S. Anatomical Structure of Karelian Birch Trunk. *Izvestiya Karelo-Finskoy nauchnoissledovatel'skoy bazy AN SSSR*, 1949, no. 1, pp. 3–19].

49. Ahokas H. Cytokinins in the Spring Sap of Curly Birch (*Betula pendula* f. *carelica*) and the Non-Curly Form. *Journal of Plant Physiology*, 1985, vol. 118, iss. 1, pp. 33-39. DOI: [10.1016/S0176-1617\(85\)80162-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(85)80162-0)

50. Anamthawat-Jónsson K., Thór Thórsson A. Natural Hybridization in Birch: Triploid Hybrids between *Betula nana* and *B. pubescens*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2003, vol. 75, iss. 2, pp. 99-107. DOI: [10.1023/A:1025063123552](https://doi.org/10.1023/A:1025063123552)

51. Bina H., Yousefzadeh H., Esmailpour M., Esmailzadeh O. Molecular Identification of the Genus *Betula* Based on ITS Sequence Data and Its Secondary Structure in Iran. *Iranian Journal of Rangelands and Forests Plant Breeding and Genetic Research*, 2014, vol. 22, no. 2 (44), pp. 168–180.

52. Consensus Document on the Biology of European White Birch (*Betula pendula* Roth). *Series on Harmonization of Regulatory Oversight in Biotechnology*, No. 28. Paris, OECD, 2003. 45 p.

53. *Convention on Biological Diversity*. Rio de Janeiro, United Nations, 1992. 28 p. Available at: <https://www.cbd.int/convention/text/> (accessed 22.04.19).

54. Dąbrowska G., Działuk A., Burnicka O., Ejankowski W., Gugnacka-Fiedor W., Goc A. Genetic Diversity of Postglacial Relict Shrub *Betula nana* Revealed by RAPD Analysis. *Dendrobiology*, 2006, vol. 55, pp. 19-23. DOI: [10.13140/RG.2.1.2160.8488](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2160.8488)

55. Etholén K., Huuri L. Visakoivua käsittelevä kirjallisuus [Bibliography on Curly Birch, *Betula pendula* var. *carelica* (Mercklin)]. *Folia Forestalia*, 1982, vol. 502. 24 p.
56. Hagman M. On Self- and Cross-Incompatibility Shown by *Betula verrucosa* Ehrh. and *Betula pubescens* Ehrh. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 1971, vol. 73 (6), pp. 1–125.
57. Hämet-Ahti L., Palmén A., Alanko P., Tigerstedt P.V. A. *Suomen puu- ja pensaskasvio* [Woody Flora of Finland]. Helsinki, Dendrologian Seura, 1989. 290 p.
58. Hämet-Ahti L., Palmén A., Alanko P., Tigerstedt P.V. A. *Suomen puu- ja pensaskasvio* [Woody Flora of Finland]. Helsinki, Dendrologian Seura, 1992. 373 p.
59. Hejtmánek G. *Betula pendula* var. *carelica* Sokolov v Československu. *Preslia*, 1957, vol. 29, pp. 264–268.
60. Hintikka T.J. Die “Wisa” – Krankheit der Birken in Finnland. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Gallenkunde*, 1922, B. 32, Nr. 5/6, S. 193–210.
61. Hodnebrog T. *Valbjørk: produksjon på utvalgte kloner*. Ås, Forskningsparken, 1996. 3 p.
62. Howland D.E., Oliver R.P., Davy A.J. Morphological and Molecular Variation in Natural Populations of *Betula*. *New phytologist*, 1995, vol. 130, iss. 1, pp. 117–124. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1995.tb01821.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb01821.x)
63. Hu Y.-N., Zhao L., Buggs R. J. A., Zhang X.-M., Li J., Wang N. Population Structure of *Betula albosinensis* and *Betula platyphylla*: Evidence for Hybridization and a Cryptic Lineage. *Annals of Botany*, 2019, vol. 123, iss. 7, pp. 1179–1189. DOI: [10.1093/aob/mcz024](https://doi.org/10.1093/aob/mcz024)
64. Hynynen J., Niemistö P., Viherä-Aarnio A., Brunner A., Hein S., Velling P. Silviculture of Birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in Northern Europe. *Forestry*, 2010, vol. 83, iss. 1, pp. 103–119. DOI: [10.1093/forestry/cpp035](https://doi.org/10.1093/forestry/cpp035)
65. Jadwiszczak K.A. What Can Molecular Markers Tell Us about the Glacial and Postglacial Histories of European Birches? *Silva Fennica*, 2012, vol. 46, no. 5, pp. 733–745. DOI: [10.14214/sf.923](https://doi.org/10.14214/sf.923)
66. Järvinen P., Palmé A., Morales L. O., Länneppää M., Keinänen M., Sapanen T., Lascoux M. Phylogenetic Relationships of *Betula* species (Betulaceae) Based on Nuclear ADH and Chloroplast *matK* Sequences. *American Journal of Botany*, 2004, vol. 91, iss. 11, pp. 1834–1845. DOI: [10.3732/ajb.91.11.1834](https://doi.org/10.3732/ajb.91.11.1834)
67. Johnsson H. Avkommor av masurbjork [Progeny of Curly Birch]. *Svenska SkogavForen. Tidskr.*, 1951, Bd. 49, Nr. 1, S. 34–45.
68. Jonsell B. *Flora Nordica: Lycopodiaceae – Polygonaceae (Vol. 1)*. Stockholm, The Bergius Foundation, 2000. 344 p.
69. Karlík P. Taxonomická problematika bříz *Betula* L. v České Republice se zvláštním zřetelem na drobné taxony z okruhu břízy pýřité *Betula pubescens* agg. [Taxonomical Problematic of the Genus *Betula* L. in the Czech Republic with Special Respect on Taxons from Group *Betula pubescens* agg.]. *Bříza – strom roku 2010: sborník z konference. Kostelec nad Černými lesy, 23 září 2010*. Praha, Česká zemědělská univerzita, 2010, pp. 61–65.
70. Kosonen M. *Visakoivu – Curly Birch*. Finland, Metsäkustannus Oy, 2004. 197 p.
71. Lascoux M., Palmé A.E., Cheddadi R., Latta R.G. Impact of Ice Ages on the Genetic Structure of Trees and Shrubs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2004, vol. 359, iss. 1442, pp. 197–207. DOI: [10.1098/RSTB.2003.1390](https://doi.org/10.1098/RSTB.2003.1390)
72. Li J., Shoup S., Chen Z. Phylogenetics of *Betula* (Betulaceae) Inferred from Sequences of Nuclear Ribosomal DNA. *Rhodora*, 2005, vol. 107, no. 929, pp. 69–86. DOI: [10.3119/04-14.1](https://doi.org/10.3119/04-14.1)
73. Lindquist B. *Forstgenetik in der schwedischen Waldbaupraxis*. Radebeul und Berlin, Neumann Verlag, 1954. 156 S.
74. Maliouchenko O., Palmé A.E., Buonamici A., Vendramin G.G., Lascoux M. Comparative Phylogeography and Population Structure of European *Betula* Species, with Particular Focus on *B. pendula* and *B. pubescens*. *Journal of Biogeography*, 2007, vol. 34, iss. 9, pp. 1601–1610. DOI: [10.1111/j.1365-2699.2007.01729.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01729.x)

75. Nagamitsu T., Kawahara T., Kanazashi A. Endemic Dwarf Birch *Betula apoiensis* (Betulaceae) is a Hybrid that Originated from *Betula ermanii* and *Betula ovalifolia*. *Plant Species Biology*, 2006, vol. 21, iss. 1, pp. 19–29. DOI: [10.1111/j.1442-1984.2006.00147.x](https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2006.00147.x)

76. Nowakowska Ju. A. Application of DNA Markers against Illegal Logging as a New Tool for the Forest Guard Service. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 2011, vol. 53, no. 2, pp. 142–149.

77. Palme A. E., Su Q., Palsson S., Lascoux M. Extensive Sharing of Chloroplast Haplotypes among European Birches Indicates Hybridization among *Betula pendula*, *B. pubescens* and *B. nana*. *Molecular Ecology*, 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 167–178. DOI: [10.1046/j.1365-294X.2003.02034.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.02034.x)

78. Palmé A. E., Su Q., Rautenberg A., Manni F., Lascoux M. Postglacial Recolonization and cpDNA Variation of Silver Birch, *Betula pendula*. *Molecular Ecology*, 2003, vol. 12, iss. 1, pp. 201–212. DOI: [10.1046/j.1365-294X.2003.01724.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01724.x)

79. Pätäälä R. V. Pirun puristama visakoivu. *Suomen Luonto*, 1980, vol. 39, no. 1, pp. 3–5.

80. Pekkinen M., Varvio S., Kulju K. K. M., Kärkkäinen H., Smolander S., Viherä Aarnio A., Koski V., Sillanpää M. J. Linkage Map of Birch, *Betula pendula* Roth, Based on Microsatellites and Amplified Fragment Length Polymorphisms. *Genome*, 2005, vol. 48(4), pp. 619–625. DOI: [10.1139/g05-031](https://doi.org/10.1139/g05-031)

81. Raulo J., Sirén G. Neljän visakoivikon päätehakkuun tuotos ja tuotto [Yield in Volume and Money of Final Cutting in Four Curly Birch Stands]. *Silva Fennica*, 1978, vol. 12, no. 4, pp. 245–252. DOI: [10.14214/sf.a14862](https://doi.org/10.14214/sf.a14862)

82. Regel E. Bemerkungen über die Gattungen *Betula* und *Alnus* nebst Beschreibung einiger neuer Arten. *Bull. Soc. Nature. Mosquae*, 1865, vol. 38, no. 4, pp. 388–434.

83. Ruden T. Om valbjørk og endel andre unormale veddannelser hos bjørk [Summary: On Speckled Birch (Mazer-Birch) and Some Other Forms of Curled Birch]. *Meddelelser fra Det Norske Skogforsøksvesen*, 1954, vol. 43, no. 12, pp. 454–505.

84. Saarnio R. Viljeltyjen visakoivikoiden laatu ja kehitys Etelä-Suomessa [The Quality and Development of Cultivated Curly-Birch (*Betula verrucosa* f. *carelica* Sok.) Stands in Southern Finland]. *Folia Forestalia*, 1976, no. 263, pp. 1–28.

85. Saarnio R. Visakoivu – vuoden puu. *Dendrologian seuran tiedotuksia*, 1980, vol. 11, no. 1, pp. 4–14.

86. Salojärvi J., Smolander O.-P., Nieminen K., Rajaraman S., Safronov O., Safdari P. et al. Genome Sequencing and Population Genomic Analyses Provide Insights into the Adaptive Landscape of Silver Birch. *Nature Genetics*, 2017, vol. 49, pp. 904–912. DOI: [10.1038/ng.3862](https://doi.org/10.1038/ng.3862)

87. Sarvas R. Visakoivikon perustaminen ja hoito. *Metsätal Aikakauslehti*, 1966, vol. 83, no. 8, pp. 331–333.

88. Schenk M. F., Thienpont C.-N., Koopman W. J. M., Gilissen L. J. W. J., Smulders M. J. M. Phylogenetic Relationships in *Betula* (Betulaceae) Based on AFLP Markers. *Tree Genetics & Genomes*, 2008, vol. 4, pp. 911–924. DOI: [10.1007/s11295-008-0162-0](https://doi.org/10.1007/s11295-008-0162-0)

89. Scholz E. Die rationelle Bewirtschaftung der Birke. *Sozialistische Forstwirtschaft*, 1963, Bd. 13, Nr. 12, S. 362–367.

90. Svoboda P. *Lesní dřeviny a jejich porosity. Část 3*. Praha, Státní zemědělské nakladatelství, 1957. 457 s.

91. Thomson A. M., Dick C. W., Pascoini A. L., Dayanandan S. Despite Introgressive Hybridization, North American Birches (*Betula* spp.) Maintain Strong Differentiation at Nuclear Microsatellite Loci. *Tree Genetics & Genomes*, 2015, vol. 11, no. 5, art. 101. 12 p. DOI: [10.1007/s11295-015-0922-6](https://doi.org/10.1007/s11295-015-0922-6)

92. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. The Origin of the Karelian Birch: An Ecogenetic Hypothesis. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*, 2017, vol. 7, iss. 6, pp. 665–677. DOI: [10.1134/S2079059717060144](https://doi.org/10.1134/S2079059717060144)

93. Vetchinnikova L., Titov A. The Mysteries of the Origin of the Curly Birch. Thünen Report 62: *Proceedings of the German Russian Conference on Forest Genetics*,

Ahrensburg, November 21–23, 2017. Braunschweig, Germany, 2018, pp. 55–60. DOI: [10.3220/REP1539855736000](https://doi.org/10.3220/REP1539855736000)

94. Wang N., McAllister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. A. Molecular Phylogeny and Genome Size Evolution of the Genus *Betula* (Betulaceae). *Annals of Botany*, 2016, vol. 117, iss. 6, pp. 1023–1035. DOI: [10.1093/aob/mcw048](https://doi.org/10.1093/aob/mcw048)

95. Wang N., Thomson M., Bodles W. J. A., Crawford R. M. M., Hunt H. V., Featherstone A. W., Pellicer J., Buggs R. J. A. Genome Sequence of Dwarf Birch (*Betula nana*) and Cross-Species RAD Markers. *Molecular Ecology*, 2013, vol. 22, iss. 11, pp. 3098–3111. DOI: [10.1111/mec.12131](https://doi.org/10.1111/mec.12131)

96. Watterson G. A., Guess H. A. Is the Most Frequent Allele the Oldest? *Theoretical Population Biology*, 1977, vol. 11, iss. 2, pp. 141–160. DOI: [10.1016/0040-5809\(77\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0040-5809(77)90023-5)

CURLY BIRCH: A VARIETY OR A SEPARATE SPECIES?

L. V. Vetchinnikova¹, Doctor of Biology, Assoc. Prof., Chief Research Scientist;

ResearcherID: [J-5665-2018](https://orcid.org/0000-0003-2091-905X), ORCID: [0000-0003-2091-905X](https://orcid.org/0000-0003-2091-905X)

A. F. Titov^{2,3}, Corresp. Member of RAS, Doctor of Biology, Prof., Head of Laboratory, Chief Research Scientist; ResearcherID: [A-6705-2014](https://orcid.org/0000-0001-6880-2411), ORCID: [0000-0001-6880-2411](https://orcid.org/0000-0001-6880-2411)

¹Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: vetchin@krc.karelia.ru

²Institute of Biology of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation

³Department of Multidisciplinary Scientific Research of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: titov@krc.karelia.ru

Curly (Karelian) birch is a unique and highly valuable representative of woody flora, whose natural growth has been preserved only in the north-west of continental Europe. The article recapitulates the development of views on the taxonomic status and systematic position of the birch. We have analyzed the numerous facts and observations, which, from our perspective, bear record to correspondence of curly birch to the species taxonomic rank. It was done based on our own and published data, and in accordance with generally accepted criteria of the species (morphological, biochemical, genetic, reproductive, geographical, and ecological). The issues of separateness and relatedness of the birch to other representatives of the genus *Betula* L. are considered. It is emphasized that the recognition of curly birch as a separate biological species is important not only for scientific reasons, but also has great environmental significance since international and national nature protection documents, regulations and laws are focused on animals and plants with a species status.

For citation: Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Curly Birch: A Variety or a Separate Species? *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 26–48. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-1-26-48](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-26-48)

Funding: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute, Institute of Biology, and Department of Multidisciplinary Scientific Research) and covered by the federal budget.

Keywords: curly birch *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, taxonomic status, species criteria, Republic of Karelia.

Поступила 22.04.19/Received on April 22, 2019

УДК 630*5:606

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-49-62

**ПОДБОР УСТОЙЧИВЫХ ВИДОВ *Rosa* L.
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЛЕСОМЕЛИОРАЦИИ, ОЗЕЛЕНЕНИЯ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БИОТЕХНОЛОГИИ
(НА ПРИМЕРЕ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

*А.С. Соломенцева*¹, науч. сотр.; *ResearcherID*: [W-4142-2018](https://orcid.org/0000-0002-5857-1004),

ORCID: [0000-0002-5857-1004](https://orcid.org/0000-0002-5857-1004)

*Н.И. Лебедь*¹, зл. науч. сотр.; *ResearcherID*: [E-8723-2017](https://orcid.org/0000-0002-8709-6089),

ORCID: [0000-0002-8709-6089](https://orcid.org/0000-0002-8709-6089)

С.В. Колмукиди^{1,2}, вед. науч. сотр.; *ResearcherID*: [G-7983-2014](https://orcid.org/0000-0003-3694-1139),

ORCID: [0000-0003-3694-1139](https://orcid.org/0000-0003-3694-1139)

*А.С. Межевова*¹, мл. науч. сотр.; *ORCID*: [0000-0002-4579-7047](https://orcid.org/0000-0002-4579-7047)

¹Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; e-mail: alexis2425@mail.ru, nik8872@yandex.ru

²Волгоградский государственный университет, пр-т Университетский, д. 100, г. Волгоград, Россия, 400062; e-mail: vnialmi@mail.ru

Подбор устойчивых и декоративных видов шиповников актуален для широкого использования в лесомелиорации и озеленении населенных пунктов засушливого региона. Объекты исследований – виды шиповников с различными ареалами естественного распространения: *Rosa rugosa* (шиповник морщинистый), в том числе форма *alba* Ware Rehder; *R. cinnatomea* (шиповник коричный); *R. beggeriana* (шиповник беггера); *R. acicularis* (шиповник иглистый); *R. spinosissima* (шиповник колючейший); *R. canina* (шиповник обыкновенный), произрастающие в пунктах интродукции на разных типах почв. В 2018 г. в Волгоградской области самым жарким месяцем был июнь, самым холодным – февраль. Наибольшее отклонение от нормы среднемесячной температуры наблюдалось в марте. В Самарской области наиболее жарким месяцем являлся июль, самым холодным – январь. В период исследований виды шиповников сохранили жизненную форму габитуса, их высота варьировала от 1,0...2,0 м (средне-рослые виды) до 0,7...0,9 м (низкорослые виды). Материалы по устойчивости видов шиповников к максимальным и минимальным температурам могут служить фактологической основой системно-ареалогического прогнозирования для географических пунктов интродукции. Степень требовательности шиповников к плодородию почв и свету выявила наиболее малотребовательные виды: *R. beggeriana*, *R. cinnatomea*, *R. rugosa* и *R. spinosissima*. Методика наблюдений Главного ботанического сада, а также полевые и лабораторные наблюдения позволили установить длительность фенологических фаз изучаемых видов. Шиповники, являясь декоративными в течение всего периода вегетации, пригодны для лесомелиорации и озеленения в зависимости от роста и цвета цветков. Для определения типов болезней и грибов-паразитов использовали микологический анализ и справочные данные. На изучаемых видах шиповников наиболее часто встречается мучнистая роса из рода *Sphaerotheca*. Аминокислотный состав плодов шиповников, установленный в системе капиллярного электрофореза «Капель» при длине волны 250 нм, выявил наиболее ценные по биохимическому составу виды. В период наблюдений за зимостойкостью шиповников наилучший результат показали виды *R. rugosa*, *R. cinnatomea* и *R. canina*, относящиеся соответственно к североамериканской, европейской и дальневосточной коллекциям. Метод априорного ранжирования показателей плодоношения, основанный на разделении факторов в порядке убывания вносимого ими вклада, выделил наиболее перспективные для использования в биотехнологии виды. Определены общая сумма рангов и сумма квадратов отклонений, по распределению числа степеней свободы получены

коэффициент конкордации и степень согласованности мнений исследователей. Установлено, что применение биотехнологических методов в современном семеноводстве наиболее актуально, полученные результаты будут способствовать улучшению и ускорению процесса семеноводства в засушливых условиях Волгоградской области. Даны рекомендации по выращиванию видов шиповников в зависимости от природно-климатических условий районов области.

Для цитирования: Соломенцева А.С., Лебедь Н.И., Колмукиди С.В., Межевова А.С. Подбор устойчивых видов *Rosa L.* для целей лесомелиорации, озеленения и использования в биотехнологии (на примере Волгоградской области) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 49–62. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-49-62

Ключевые слова: *Rosa L.*, рост и развитие шиповников, биотехнологии, зеленое строительство, априорное ранжирование, фитопатогены.

Введение

В засушливом регионе защитное лесоразведение основывается на применении интродуцированных видов, которые изучаются на пригодность для лесохозяйственных целей и устойчивость к неблагоприятным климатическим факторам (морозу, засухе) [10]. Наиболее пригодными для отбора являются виды, испытавшие в процессе своего роста систематическое воздействие экстремальных условий и достигшие оптимального возраста [11, 19]. Наибольшее преимущество перед деревьями по своим морфологическим и биологическим признакам имеют кустарники, которые отличаются лучшим развитием габитуса, формой крон и ярко выраженными положительными биологическими свойствами [17]. Интродукция кустарников семейства *Rosaceae* актуальна для каштановых и светло-каштановых почв засушливой зоны. Шиповники, как виды, обладающие эколого-хозяйственным потенциалом и неприхотливые к условиям произрастания, имеют большое хозяйственное и лесомелиоративное значение для биотехнологий [10, 14]. В настоящее время культура шиповника используется в двух основных направлениях: первое – плодое [21] (когда в переработку идут мягкие оболочки гареалипанты – ложного плода, как в свежем виде, так и в виде концентратов для витаминной и пищевой промышленности); второе – для получения масла из свежих и высушенных плодов [18, 20]. Шиповник является одним из важнейших источников каротина и аскорбиновой кислоты для пищевой и фармакологической промышленности [2, 15].

Актуальность исследования определяется недостаточной изученностью полифункциональных и адаптационных возможностей видов рода шиповник в засушливых условиях [20, 23].

Цель исследований – биоэкологическая оценка и подбор наиболее ценных, устойчивых и декоративных видов шиповников для их широкого использования в биотехнологии переработки сырья и озеленении населенных пунктов засушливого региона [16].

Объекты и методы исследования

Объектами исследований являлись имеющие разный возраст и различные естественные ареалы виды шиповников, включая низкорослые формы: *Rosa rugosa* Thunb. (шиповник морщинистый) и его форма *alba* Ware Rehd.; *R. cinnamomea* L. (шиповник коричный); *R. beggeriana* Shrenk. (шиповник беггера); *R. acicularis* Lindl. (шиповник иглистый); *R. spinosissima* L. (шиповник колючейший); *R. canina* L. (шиповник обыкновенный), произрастающие на каштановых и светло-каштановых почвах в дендрокolleкциях Федерального

научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения (ФНЦ агроэкологии) РАН (табл. 1).

Таблица 1

**Виды шиповников, интродуцированные в дендрокolleкции
ФНЦ агроэкологии РАН**

Название видов рода <i>Rosa</i> L.	Ареал естественного распространения	Год посадки		
		г. Камышин	г. Самара	г. Волгоград
<i>R. canina</i>	Европейская часть России, Средняя Азия, Западная Европа, Турция, Иран, Северная Африка	1930	1961	1966
<i>R. begeriana</i>	Средняя Азия, Западный Китай, Турция, Пакистан	–	–	1966
<i>R. spinosissima</i>	Урал, Западная Сибирь, Крым, Кавказ, Западный Китай, Скандинавия, Казахстан	–	–	1966
<i>R. cinnamomea</i>	Европейская часть России, Сибирь, Средняя Европа, Скандинавия	1981	–	1966
<i>R. rugosa</i>	Дальний Восток, Сахалин, Южная Камчатка, Корея, Северный Китай, Япония	1936	1961	1965
<i>R. acicularis</i>	Северная Монголия, Северный Китай, Япония, Северная Америка	–	–	1966

Почвы участка произрастания опытных образцов (ФГУП «Волгоградское» – Волгоградский опытный участок) – светло-каштановые, средние немощные среднесуглинистые на делювиальном наносе, состоящем из песков. Содержание гумуса – 0,60...1,18 %, содержание азота, фосфора, калия – типичное для светло-каштановых почв [8]. В бору Кулундинского дендрария (г. Самара) формируются боровые дерново-подзолистые песчаные почвы, основной тип почв – каштановые и темно-каштановые. В Камышинском дендрарии почвы каштановые, маломощные, суглинистые.

Основные фазы роста и фенологического развития шиповников изучали по методике Главного ботанического сада на основе натуральных и лабораторных наблюдений [5, 6], декоративность видов – по методикам А.В. Семенютиной [9, 22].

Фитосанитарное состояние шиповников определяли по соответствующим общепринятым методикам в авторской доработке с учетом особенностей и типа болезни [4] путем микологического анализа гербаризированных образцов. Для идентификации видов грибов-паразитов растений использовали специальную справочную литературу [12, 13]. Метод априорного ранжирования при оценке показателей плодоношения основывался на ранжировании факторов в порядке убывания вносимого ими вклада. Вклад фактора оценивали по величине ранга, присвоенного конкретному фактору при ранжировании всех факторов с учетом их предполагаемого влияния на параметр оптимизации [1]. Полученную информацию обрабатывали следующим образом: определяли сумму рангов по факторам; разность (Δi) между суммой каждого фактора и средней суммой рангов; сумму квадратов отклонений (s). Согласованность мнений экспертов оценивали с помощью коэффициента конкордации ω , оценку его значимости устанавливали по χ^2 -распределению с числом степеней

свободы $f = n - 1$. Гипотеза о наличии согласованности мнений авторов принята при заданном числе степеней свободы табличного значения χ^2 меньше расчетного для 5 %-го уровня значимости. Аминокислотный состав плодов шиповников определяли в системе капиллярного электрофореза «Капель» при длине волны 250 нм. Характеристику погодных условий брали по данным сайта «Климатический монитор» [7].

По климатическим характеристикам в Волгоградской области наиболее засушливым был июль 2017 г., максимальная температура – 39,4 °С, а в 2018 г. температура этого месяца составила 37,1 °С. Самым холодным месяцем был февраль 2017 г. с температурой –25,0 °С, а в 2018 г. температура составила –17,8 °С (табл. 2) [7].

Таблица 2

**Агрометеорологические характеристики Волгоградской области
(в числителе – 2017 г., в знаменателе – 2018 г.)**

Месяц	Температура воздуха, °С				
	среднемесячная (норма)	фактическая	отклонение от нормы	среднемесячная	
				min	max
I	–6,3	–6,1/–6,8	+0,2/–0,5	–24,4/–17,6	2,7 /3,1
II	–6,6	–6,0/–6,4	+0,6/+0,2	–25,0 /–17,8	8,7 / 2,5
III	–0,5	3,3/–4,7	+3,8/–4,2	–5,9/–17,3	13,1/4,6
IV	9,2	9,4/9,3	+0,2/+0,1	–3,4 /–2,7	25,0 /26,7
V	15,9	15,2/19,9	+0,7/+4,0	4,0/4,4	29,3/36,6
VI	21,0	20,2/22,7	–0,8/+1,7	3,6/1,1	34,7/38,4
VII	23,6	24,8/25,8	+1,2/+2,2	9,1/17,5	39,4/37,1
VIII	22,3	26,0/23,1	+3,7/+0,8	14,7/10,0	40,0/33,9
IX	15,6	17,9/18,9	+2,3/+3,3	–0,4/1,1	33,0/32,1
X	8,1	8,4/10,8	+0,3/+2,7	–1,3/–0,7	22,9/22,7
XI	0,3	2,4/–0,9	+2,1/–1,2	–7,1/–13,3	12,7/11,5
XII	–4,7	–0,7/–4,4	+4,0/–0,2	–8,0/–18,4	6,7/1,9

В Самарской области средняя температура самого теплого летнего месяца, июля, составила 21,0 °С, самого холодного, января, –13 °С.

Результаты исследования и их обсуждение

По сохранению габитуса, побегообразовательной способности, приростам в высоту и развитию генеративных органов можно судить о возможности разрастания шиповников. В период исследования (2018–2019 гг.) растения сохранили присущую им в природе жизненную форму габитуса, что соответствует 10 баллам по шкале сохранности.

Показатели высоты видов варьируют: ростом от 1,0 до 2,0 м отличаются виды *Rosa: canina, beggeriana, cinnatomea, rugosa* и *acicularis*. *Rosa rugosa* (ф. низкорослая) и *spinosissima* (ф. низкорослая) в условиях светлокаштановых почвы могут достигать 0,70...0,90 м. Однолетние побеги шиповников в период исследования развились полностью на 100 % (20 баллов). Наилучший прирост был отмечен у молодых растений. В условиях Волгоградской области наиболее раннее зацветание наблюдалось у шиповника колючейшего (*R. spinosissima*) – 8 мая; видов обыкновенный (*R. canina*) – 10 мая и коричный (*R. cinnatomea*) – 13 мая (табл. 3).

Окраска цветов у шиповников: от белого (*R. beggeriana*), лимонно-желтого (*R. ecae*) и кремового (*R. spinosissima*) до розового (*R. canina, R. pomifera, R. acicularis, R. cinnatomea*) и пурпурного (*R. rugosa*) цвета. Наибольшим диаметром цветка отличается *R. rugosa* в ФГУП «Волгоградское».

Таблица 3

**Средние сроки цветения и плодоношения шиповников
в засушливых условиях 2017–2018 гг.**

Вид	Сроки цветения (начало/конец)	Цветение, дн.	Окраска цветка	Диаметр цветка, см	Сроки созревания плодов (начало/конец)
<i>г. Волгоград</i>					
<i>R. spinosissima</i>	8.V/18.V	7...12	Кремевая	5,0±0,11	19.V/25.VI
<i>R. cinnamomea</i>	10.V/19.V	10...12	Темно- пурпурная	5,0±0,26	2.VII/17.VIII
<i>R. rugosa</i>	12.V/30.VIII	90	Пурпурная	6,5±0,25	9.VII/27.IX
<i>R. canina</i>	9.V/19.V	7...10	Розовая	6,0±0,20	6.VIII/25.VIII
<i>R. acicularis</i>	13.V/22.V	7...12	Темно- розовая	5,0±0,32	24.VII/23.VIII
<i>R. beggeriana</i>	10.V/18.V	7...11	Белая	4,0±0,20	3.VII/11.VIII
<i>г. Камышин</i>					
<i>R. cinnamomea</i>	20.V/30.V	10...12	Темно- пурпурная	4,6±0,11	8.VII/19.VIII
<i>R. canina</i>	15.V/23.V	7...10	Розовая	5,6±0,36	9.VIII/30.VIII
<i>R. rugosa</i>	18.V/28.VIII	80	Пурпурная	5,8±0,28	12.VII/29.IX
<i>г. Самара</i>					
<i>R. canina</i>	19.V/28.V	7...9	Розовая	5,2±0,19	12.VIII/2.IX
<i>R. rugosa</i>	7.VI/20.III	40...70	Пурпурная	4,8±0,24	18.VII/11.X

Проведенные исследования позволяют определить направления практического использования шиповников.

Для создания долговечных и устойчивых насаждений важно знать отношение видов к влиянию различных экологических факторов окружающей среды и реакцию его на изменение условий. По степени требовательности к факторам окружающей среды все виды шиповников разделяют на группы. По отношению к плодородию почв малотребовательными являются виды *R. beggeriana*, *R. cinnamomea*, *R. rugosa* и *R. spinosissima*. Вид *R. canina* отличается средней требовательностью. По отношению к свету наиболее светолюбивы виды *R. beggeriana*, *R. cinnamomea*, *R. rugosa*. К среднесветолюбивым относятся *R. canina*, *R. spinosissima*. Требования растений к температурным условиям определяются их наследственностью и происхождением из определенных природных зон. Представленность исследуемых видов различна по спектру ареалогических районов. Повышение лесомелиоративной эффективности насаждений возможно за счет видов, устойчивых к низким температурам и имеющих хорошее общее состояние и рост после воздействия стресс-факторов. Наиболее морозостойкие шиповники являются пластичными видами, о чем свидетельствуют их адаптационные способности.

В ходе исследования определялась зимостойкость изучаемых видов шиповников. Виды Волгоградского и Самарского опытных участков не обмерзли в зимний период, наибольшей зимостойкостью отличились *R. rugosa*, *R. cinnamomea* и *R. canina*, относящиеся соответственно к североамериканской, европейской и дальневосточной коллекциям. Их ареалы совпадают с географической широтой Волгоградской области, что помогло им адаптироваться к местным природно-климатическим условиям. Восточно-азиатский вид *R. beggeriana* имеет меньший балл зимостойкости, так как на растениях было

отмечено обмерзание около 40 % однолетних побегов, поэтому его рекомендуется вводить в районы, расположенные южнее. Таким образом, климат Волгоградской области благоприятен для шиповников из Северной Америки, Японии, Китая, Средней Азии. Обобщенный материал по зимостойкости изучаемых видов шиповников может стать фактологической основой системно-ареалогического прогнозирования для географических пунктов интродукции.

Оценка экологических свойств и декоративных достоинств, а также принадлежности к различным группам роста видов шиповников позволяет отбирать и рекомендовать их для зеленого строительства и лесомелиоративного обустройства. В целях озеленения среднерослые шиповники (*R. beggeriana*, *R. acicularis*, *R. cinnatomea*, *R. canina*) пригодны для создания цветущих живых изгородей (лент), а низкорослые виды (*R. ecae*, *R. rugosa* и его форма *alba* Ware Rehd., *R. spinosissima*) – цветущих бордюров. Для целей лесомелиорации предпочтительны все изучаемые виды, так как они имеют высокую ирруптивную способность (разрастание подземно и надземно). По данным наших наблюдений за 2018–2019 гг., число парциальных кустов в общей системе куртины возраста 15–18 лет достигало более 70 шт. В своем развитии они уступали маточному растению, их расположение носило почти равномерный характер от маточного куста (рис. 1).



a



б

Рис. 1. Куртина *R. cinnatomea* (г. Волгоград): *a* – осень 2018 г., *б* – весна 2019 г.

Fig. 1. Bed of *R. cinnatomea* (Volgograd): *a* – autumn 2018, *б* – spring 2019

Шиповник может занимать площадь радиусом 3,0...4,0 м и более при ровном и однородном почвенном участке, задерживать и равномерно распределять на поле снег, снижать силу ветра, положительно влиять на температуру межполосного поля в зимнее и летнее время, повышать относительную влажность воздуха, оказывать большое влияние на улучшение мелиоративного состояния почв.

Обследование насаждений с участием видов *Rosa L.* выявило наличие патогенной микрофлоры на стеблях и ветках фитопатогенов, вызывающих различные типы болезней (табл. 4): мучнистую росу – из рода *Sphaerotheca* (распространение до 65,8 %); ложную мучнистую росу – *Peronospora* (30,4 %); разного рода пятнистости – *Cercospora*, *Diplocarpon*, *Passalora*, *Physalospora* (20,4...40,5 %); ржавчину – *Phragmidium* (до 46,7 %); некроз – *Diplodia* (12,4...37,6 %); ожог и рак – *Coniothyrium* (до 27,4 %).

Таблица 4

**Видовой состав фитопатогенов, поражающих шиповники,
в Волгоградской области (2018 г.)**

Вид растения-хозяина	Род, вид гриба	Вид болезни	Место обитания на растении	Встречаемость
<i>R. acicularis</i>	<i>Diplodia rosarum</i> Fr.	Пятнистость	Листья	Спорадически
		Диплодиозный некроз	Кора	
<i>R. spinosissima</i>	<i>Sphaerotheca pannosa</i> (Wallr.) Lev.	Мучнистая роса	Листья	Часто
	<i>Diplodia rosarum</i> Fr.	Пятнистость	Листья	Часто
Диплодиозный некроз		Стебли		
<i>R. rugosa f. alba</i> Ware Rehd.	<i>Coniothyrium wernsdorffiae</i> Laub.	Ожог, рак	Листья, побеги	Часто
	<i>Sphaerotheca pannosa</i> (Wallr.) Lev.	Мучнистая роса	Листья	Спорадически
	<i>Peronosporas parsae</i> Berk.	Ложная мучнистая роса	Листья	Редко
<i>R. rugosa</i>	<i>Diplocarpon rosae</i> F.A. Wolf.	Пятнистость	Листья	Спорадически
<i>R. canina</i>	<i>Peronosporas parsae</i> Berk.	Ложная мучнистая роса	Листья	Редко
	<i>Sphaerotheca pannosa</i> (Wallr.) Lev.	Мучнистая роса	Листья	Часто
	<i>Phragmidium tuberculatum</i> Jul. Müll.	Ржавчина	Листья	Часто
<i>R. cinnamomea</i>	<i>Passalora rosicola</i> (Pass.) U. Braun	Пятнистость	Листья	Часто
	<i>Physalospora rosicola</i> (Fuckel) Sacc.	Пятнистость	Листья	Спорадически

Выявлены наиболее адаптированные формы шиповника на основе изучения их патологического состояния в различных условиях произрастания. По нашим данным относительно высокой устойчивостью к вредоносным патогенам в засушливых условиях обладают *R. spinosissima* и *R. canina*, которые рекомендуются для создания искусственных насаждений. Для декоративных посадок города подойдут *R. rugosa f. alba* Ware Rehder, *R. rugosa* и *R. spinosissima*, как устойчивые к патогенам в неблагоприятных условиях урбоэкосистем [3].

Плоды шиповников характеризуются высокой кормовой производительностью и ценными питательными свойствами. В условиях засушливой зоны исследуемые виды очень трудно размножаются семенами, а от качества посадочного материала зависит рост и развитие растений, их технические качества и устойчивость против неблагоприятных метеорологических условий, грибных болезней и вредоносных насекомых.

Применение биотехнологических методов в современном семеноводстве наиболее актуально, полученные нами результаты будут способствовать улучшению и ускорению семеноводства.

Одним из способов совершенствования процесса биотехнологии плодов шиповника является углубленная работа, связанная с исследованием исходного материала растений. При этом первичный отбор таких растений, как правило, основывается на оценке внешних признаков – типичности растений для своего вида и сорта; последующая оценка возможна с применением методов полимеразной цепной реакции и иммуноферментного анализа.

Однако возможны другие подходы к оценке исходного материала растений, более эффективные, чем визуальный осмотр, но менее затратные, с применением дорогостоящего лабораторного оборудования.

К таким подходам следует отнести оценку физико-механических свойств плодов шиповника с последующей статистической обработкой результатов, чтобы выявить не только средние значения, типичные именно для этого растения-экспланта, но и долю таких средних значений в пределах генеральной и выборочных совокупностей [1].

Качество плодоношения определяли методом априорного ранжирования. С учетом 5 %-го уровня значимости и числа степеней свободы $f = 6$ табличное значение критерия $\chi^2 = 12,6$. Следовательно, согласованность мнений экспертов установлена (табл. 5).

Для дальнейшего планирования эксперимента целесообразно оставить два фактора (x_1 и x_8), которые показали, что наиболее значимыми показателями в оценке плодоношения являются урожайность (масса плодов на 1 кусте) и масса 1 плода. Наибольшей массой плода, по данным наших наблюдений, обладает вид *R. acicularis* (2,69 г), наибольшей урожайностью – вид *R. canina* (2,74 кг/куст), т. е. эти виды являются наиболее перспективными для микроклонального размножения в засушливых условиях Волгоградской области. В Самарском дендрарии на растениях было примерно 50 % полноценных плодов от полного плодоношения, по размерам они были значительно меньше волгоградских видов.

Таблица 5

Исследователи-эксперты*	Фактор x ($n = 8$)								Сумма факторов
	Урожайность (масса плодов на куст), кг/куст	Масса семян в 1 плоде, г	Выход мякоти, %	Ширина плода, см	Длина плода, см	Длина семени, мм	Ширина семени, мм	Масса 1 плода, г	
1	8	4	6	5	3	2	1	7	–
2	7	3	5	4	6	2	1	8	
3	8	4	6	5	3	2	1	7	
4	8	5	6	4	3	1	2	7	
5	7	4	5	6	3	1	2	8	
$\sum^n a_i$ (сумма сложения величин)	38	20	28	24	18	8	7	37	180
Δi (разность между суммой каждого фактора)	–15,5	2,5	–5,5	–1,5	4,5	14,5	15,5	–14,5	
$(\Delta i)^2$ (разность между суммой квадратов отклонений каждого фактора)	240,25	6,25	30,25	2,25	20,25	210,25	240,25	210,25	960

* Авторы статьи.

В процессе лабораторных исследований были определены массовые доли аминокислот: аргинина (Arg), лизина (Lys), тирозина (Tyr), фенилаланина (Phe), гистидина (His), лейцина и изолейцина (Leu + Ile) (суммарно), метионина (Met), валина (Val), пролина (Pro), серина (Ser), аланина (Ala), глицина (Gly) и триптофана (Trp) в плодах, а также их хозяйственная ценность. Белок, влага, сырой жир, фосфор и другие полезные элементы, содержащиеся в плодах шиповников, – это основной строительный материал для мышц, кровеносной и иммунной систем, а также кожи, волос и ногтей человека. Наибольшее содержание аргинина (252 мг %), тирозина (77 мг %), фенилаланина (123 мг %), гистидина (57 мг %), лейцина и изолейцина (269 мг %), треонина (93 мг%), серина (114 мг %), аланина (119 мг %), глицина (179 мг %) было обнаружено в плодах *R. canina*, лизина (65 мг %) – в плодах *R. acicularis*, метионина (151 мг %), пролина (159 мг %) и триптофана (143 мг %) – в плодах *R. cinnamomea*. Аминокислотный состав оказывает весь спектр полезных действий на организм человека: улучшает иммунитет, работу сердца; повышает энергичность и работоспособность; лечит остеопороз и анемию; улучшает зрение; формирует коллаген; выступает как средство профилактики атеросклероза; оказывает влияние на центральную нервную и сердечно-сосудистую системы; благотворно влияет на работу печени (табл. 6).

Таблица 6

**Биохимический и аминокислотный состав плодов шиповников
Волгоградского опытного участка**

Показатель	Содержание, %, в различных видах <i>Rosa</i>					
	<i>canina</i>	<i>cinnamomea</i>	<i>rugosa</i>	<i>acicularis</i>	<i>spinosissima</i>	<i>beggeriana</i>
Белок	5,33	7,30	1,95	2,89	2,14	2,86
Влага	9,83	8,00	48,61	55,05	44,88	22,18
Сырой жир	1,29±0,43	1,00±0,42	1,39±0,44	0,90±0,42	1,28±0,43	1,75±0,46
Фосфор	0,08±0,02	0,07±0,02	0,03±0,01	0,08±0,02	0,14±0,03	0,13±0,03
Сырая зола	3,8±0,2	3,8±0,2	2,5±0,1	1,8±0,1	3,2±0,2	4,0±0,2
Кальций	0,88±0,11	0,50±0,08	0,27±0,06	0,38±0,07	0,98±0,12	0,95±0,11
Сырая клетчатка	8,93±1,37	11,44±1,49	5,32±1,19	5,28±1,18	6,13±1,23	8,23±1,33
Иод*	0,29±0,13	0,18±0,08	0,18±0,08	0,27±0,13	0,21±0,10	0,27±0,13
Arg	252	123	75	167	28	91
Lys	50	59	39	65	24	24
Tyr	77	42	27	47	27	44
Phe	123	98	41	63	41	55
His	57	17	49	57	17	42
Leu + Ile	269	207	152	196	111	175
Met	80	151	54	86	28	84
Val	110	19	21	30	59	120
Pro	154	159	72	99	37	61
Tre	93	72	33	64	–	–
Ser	114	105	68	62	41	75
Ala	119	100	66	69	30	74
Gly	179	150	77	102	67	121
Trp	85	143	60	78	57	75

*В миллиграммах на килограмм.

Заключение

Широкое применение видов рода шиповник для обогащения лесомелиоративных комплексов в малолесных районах будет способствовать стабилизации сельскохозяйственных земель в условиях опустынивания и деградации ландшафтов. Они существенно обогатят дендрофлору, изменят ярусность посадок, их многоцелевые, полифункциональные и адаптационные возможности довольно высоки. Создаваемые куртины из шиповников обеспечат улучшение микроклимата на прилегающих к ним участках и приведут к дальнейшему облесению промоин и залужению возвышений между ними. В экологическом плане создание зеленых насаждений с участием шиповников выражается в устройстве экологических ниш, смягчающих действие неблагоприятных климатических условий на выращиваемые растения.

Для пастбищезащитных насаждений на черноземных, каштановых, светло-каштановых почвах и пойменных землях рекомендуется использовать следующие виды *Rosa*: *rugosa* (*alba* War Rehd.), *beggeriana*, *cinnamomea*, *cani-*

на. В овражно-балочные и озеленительные насаждения черноземных почв, районов с каштановыми и светло-каштановыми почвами рекомендуются все вышеперечисленные виды, на пойменных землях – виды *Rosa: beggeriana, spinosissima, cinnamomea, rugosa, canina*, в озеленительные – *R. rugosa (alba War Rehd.)*.

Показатели плодоношения и лекарственные свойства плодов шиповников (видов *R. canina* и *R. acicularis*) могут быть использованы в медицинских целях. Биотехнологии в результате отбора видов по особо ценным хозяйственным признакам позволят улучшить приживаемость и показатели семенного размножения этих растений, использовать их в промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антонов Н.М., Лебедь Н.И., Венецианский А.С., Мамахай А.К. Определение фрикционных характеристик корнеклубнеплодов // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 4(40). С. 162–168. [Antonov N.M., Lebed N.I., Venecianski A.S., Mamahai A.K. Determination Friction Characteristics Root Crops. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye* [Proceedings of Nizhnevolzskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education], 2015, no. 4(40), pp. 162–168].
2. Зонтиков Д.Н., Зонтикова С.А. Особенности клонального микроразмножения некоторых декоративных сортов *Rosa hybrida* // Вестн. Костром. гос. ун-та им. Н.А. Некрасова. 2011. № 5-6. С. 12–15. [Zontikov N.D., Zontikova S.A. Features of Micropropagation of Some Decorative Cultivar *Rosa hybrid*. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N.A. Nekrasova* [Vestnik of Kostroma State University], 2011, no. 5-6, pp. 12–15].
3. Колмукиди С.В. Патогенная дендротрофная микобиота городских насаждений Волгограда и Камышина // Агроекология, мелиорация и защитное лесоразведение: материалы междунар. науч.-практич. конф., Волгоград, 18–20 окт. 2018 г. Волгоград: ФНИЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН. 2018. С. 262–267. [Kolmukidi S.V. Pathogenic Dendrotrophic Mycobiota of Urban Plantations of Volgograd and Kamyshin. *Agroecology, Reclamation and Protective Afforestation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Volgograd, October 18–20, 2018*. Volgograd, FRC for Agroecology, Complex Reclamation and Protective Afforestation RAS Publ., 2018, pp. 262–267].
4. Колмукиди С.В., Крюкова Е.А. Методы эколого-патологической оценки древесных растений в условиях интродукции для выявления их адаптивного потенциала // Наука. Мысль. 2016. № 7-1. С. 52–68. [Kolmukidi S.V., Kryukova E.A. Methods of Ecological and Pathological Evaluation of Trees in Conditions of Introduction to Determine Their Adaptive Capacity. *Nauka. Mysl'* [Science. Thought], 2016, no. 7-1, pp. 52–68].
5. Молчанов А.А., Смирнов В.В. Методика изучения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 95 с. [Molchanov A.A., Smirnov V.V. *Methods of Studying the Growth of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 95 p.].
6. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР // Бюл. ГБС АН СССР. 1979. Вып. 113. С. 3–8. [Methods of Phenological Observations in the Botanical Gardens of the USSR. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada AN SSSR* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1979, vol. 113, pp. 3–8].
7. Погода и климат. Справочно-информационный портал. Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 18.03.2019 г.). [Weather and Climate. Information and Reference Portal. 2019].
8. Пындак В.И., Новиков А.Е., Межевова А.С. Возрождение плодородия полупустынных и деградированных земель // Альманах – 2013. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2013.

С. 45–49. [Pyndak V.I., Novikov A.E., Mezhevova A.S. Restoration of Fertility of Semi-Arid and Degraded Lands. *Almanac – 2013*. Volgograd, VolGU Publ., 2013, pp. 45–49].

9. Семенютина А.В., Зеленьяк А.К., Долгих А.А., Хужахметова А.Ш., Костюков С.М., Сапронова Д.В., Соломенцева А.С., Богданов А.В., Шилов Е.П., Ульянов Д.В. Научно-методические указания по оптимизации дендрофлоры лесомелиоративных комплексов: науч.-метод. рекомендации. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2012. 40 с. [Semenyutina A.V., Zelenyak A.K., Dolgikh A.A., Khuzhakhmetova A.Sh., Kostyukov S.M., Sapronova D.V., Solomentseva A.S., Bogdanov A.V., Shilov E.P., Ul'yanov D.V. *Scientific and Methodological Guidelines for Dendroflora Optimization of Agroforestry Complexes: Scientific and Methodological Recommendations*. Volgograd, VNIALMI Publ., 2012. 40 p.]

10. Семенютина А.В., Соломенцева А.С. Обоснование ассортимента шиповников для обогащения лесомелиоративных комплексов в засушливых условиях // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2013. № 3(31). С. 74–79. [Semenyutina A.V., Solomentseva A.S. Substantiation of the Assortment of Wild Roses for the Enrichment of Agroforestry Complexes in Arid Conditions. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye* [Proceedings of Nizhnevolzskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education], 2013, no. 3-1(31), pp. 74–79].

11. Соломенцева А.С. Внутривидовой полиморфизм шиповников в условиях засушливой зоны как фактор повышения биоразнообразия урбанизированных территорий // Наука. Мысль. 2016. №7-1. С. 117–127. [Solomentseva A.S. Intraspecific Polymorphism of Dogroses in Conditions of Arid Zones as Factor of Increasing Biodiversity in Urban Areas. *Nauka. Mysl'* [Science. Thought], 2016, no. 7-1, pp. 117–127].

12. Станчева Й., Роснев Б. Атлас болезней сельскохозяйственных культур. Т. 5. Болезни декоративных и лесных культур. София-М.: PENSOFT, 2005. 246 с. [Stancheva Y., Rosnev B. *Atlas of Agricultural Crop Diseases. Vol. 5. Diseases of Ornamental and Forest Crops*. Sofia, PENSOFT Publ., 2005. 246 p.]

13. Трейвас Л.Ю. Болезни и вредители роз: Атлас-определитель. М.: Фитон+, 2009. 128 с. [Treivas L.U. *Diseases and Pests of Roses: A Reference Book*. Moscow, Fiton+ Publ., 2009. 128 p.]

14. Alpert P., Bone E., Holzappel C. Invasiveness, Invasibility and the Role of Environmental Stress in the Spread of Non-Native Plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2000, vol. 3, iss. 1, pp. 52–66. DOI: [10.1078/1433-8319-00004](https://doi.org/10.1078/1433-8319-00004)

15. Callaway R.M., Ridenour W.M., Laboski T., Weir T., Vivanco J.M. Natural Selection for Resistance to the Allelopathic Effects of Invasive Plants. *Journal of Ecology*, 2005, vol. 93, no. 3, pp. 576–583.

16. Canli F.A., Kazaz S. Biotechnology of Roses: Progress and Future Prospects. *Türkiye Ormanlık Dergisi* [Turkish Journal of Forestry], 2009, Cilt 10, Sayı 1, pp. 167–183.

17. Isermann M. Expansion of *Rosa rugosa* and *Hippophaë rhamnoides* in Coastal Grey Dunes: Effects at Different Spatial Scales. *Flora*, 2008, vol. 203, iss. 4, pp. 273–280. DOI: [10.1016/j.flora.2007.03.009](https://doi.org/10.1016/j.flora.2007.03.009)

18. Joublan J.P., Rios D. Rose Culture and Industry in Chile. *Acta Horticulturae*, 2005, no. 690, pp. 65–70. DOI: [10.17660/ActaHortic.2005.690.8](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.690.8)

19. Kollmann J., Bañuelos M.J. Latitudinal Trends in Growth and Phenology of the Invasive Alien Plant *Impatiens glandulifera* (Balsaminaceae). *Diversity and Distributions*, 2004, vol. 10, iss. 5-6, pp. 377–385. DOI: [10.1111/j.1366-9516.2004.00126.x](https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2004.00126.x)

20. Kollmann J., Frederiksen L., Vestergaard P., Bruun H.H. Limiting Factors for Seedling Emergence and Establishment of the Invasive Non-Native *Rosa rugosa* in a Coastal Dune System. *Biological Invasions*, 2007, vol. 9, iss. 1, pp. 31–42. DOI: [10.1007/s10530-006-9003-y](https://doi.org/10.1007/s10530-006-9003-y)

21. Poppek R. *Dziko rosnaçe róze Europy*. Kraków, Officina Botanica, 2007. 120 s.

22. Semenyutina A.V., Podkovyrov I.U., Semenyutina V.A. Environmental Efficiency of the Cluster Method of Analysis of Greenery Objects' Decorative Advantages. *Life Science Journal*, 2014, vol. 11, no. 12s, pp. 699–702. DOI: [10.7537/marslsj1112s14.151](https://doi.org/10.7537/marslsj1112s14.151)

23. Solomentseva A.S., Kostyukov S.M. Laws of Intraspecific Polymorphism of *Rosa canina* on Endogenous, Population and Geographical Levels for Their Effective Practical Application. Вектор развития современной науки: материалы X Международной науч.-практ. конф., 3 апр. 2016 г. М.: Олимп, 2016. С. 40–44. [Development Thrust of the Modern Science: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, April 3, 2016. Moscow, Olimp Publ., 2016, pp. 40–44].

SELECTION OF RESISTANT SPECIES OF *Rosa* L. FOR THE PURPOSES OF FOREST RECLAMATION, LANDSCAPING AND USE IN BIOTECHNOLOGY (ON THE EXAMPLE OF VOLGOGRAD REGION)

A.S. Solomentseva¹, Research Scientist; ResearcherID: [W-4142-2018](#),

ORCID: [0000-0002-5857-1004](#)

N.I. Lebed¹, Chief Research Scientist; ResearcherID: [E-8723-2017](#),

ORCID: [0000-0002-8709-6089](#)

S.V. Kholmukidi^{1,2}, Leading Research Scientist; ResearcherID: [G-7983-2014](#),

ORCID: [0000-0003-3694-1139](#)

A.S. Mezheva¹, Junior Research Scientist; ORCID: [0000-0002-4579-7047](#)

¹Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences», prosp. Universitetskiiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation;

e-mail: alexis2425@mail.ru, nik8872@yandex.ru

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Volgograd State University», prosp. Universitetskiiy, 100, Volgograd, 400062, Russian Federation; e-mail: vnialmi@mail.ru

Selection of sustainable and ornamental rosehip species is relevant for their widespread use in forest reclamation and landscaping of settlements in the arid region. The objects of research were rosehips with different areas of natural expansion: *R. rugosa*, including form *alba* War Rehder, *R. cinnamomea*, *R. beggeriana*, *R. acicularis*, *R. spinosissima*, *R. canina* growing at points of introduction on different soils. In 2018, June was the hottest month, while February was the coldest month in Volgograd region. The maximum deviation from the average monthly temperature was observed in March. July and January were the hottest and the coldest months, respectively, in Samara region. During the research period, the species of wild roses retained the life form of habitus, and their height varied from 1.0–2.0 m (medium-grown species) to 0.7–0.9 m (short species). Data on the resistance of rosehip species to the maximum and minimum temperatures can be the factual basis of system-arealogical forecasting for geographical points of introduction. The degree of demand of rosehips to soil fertility and light was revealed by poor-demanding species: *R. beggeriana*, *R. cinnamomea*, *R. rugosa* and *R. spinosissima*. The observing method of the Main Botanical garden, field and laboratory observations allowed to establish the duration of the phenological phases of the studied species. Rosehips, being ornamental throughout the growing season, are useful in forest reclamation and landscaping, depending on the growth and color of their flowers. Types of diseases and parasitic fungi were determined by mycological analysis and reference data. The most common disease of the studied species of rosehips is powdery mildew from the genus *Sphaerotheca*. Amino acid profile of rosehip fruits was determined by the capillary electrophoresis system “Kapel” at a wavelength of 250 nm and allowed to identify the most valuable by biochemical composition species. In the period of monitoring the winter hardiness of rosehips, the best result was shown by the species *R. rugosa*, *R. cinnamomea* and *R. canina*, belonging to the North American, European and Far Eastern collections. The method of a priori ranking of fruiting indicators based on the division of factors in the descending order of their contribution revealed the most promising species for use in bio-

technology. The total sum of ranks and the sum of squares of deviations were determined; the concordance coefficient and the degree of consistency of the researchers' opinions are obtained in accordance with the degrees-of-freedom breakdown. It was found that the use of biotechnological methods in modern seed production is the most pressing; the obtained results will contribute to the improvement and acceleration of the seed production process in the arid conditions of Volgograd region. Recommendations are given for the cultivation of rosehips depending on the natural and climatic conditions of the different districts of the region.

For citation: Solomentseva A.S., Lebed' N.I., Kolmukidi S.V., Mezhevova A.S. Selection of Resistant Species of *Rosa* L. for the Purposes of Forest Reclamation, Landscaping and Use in Biotechnology (On the Example of Volgograd Region). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 49–62. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-49-62

Keywords: *Rosa* L., growth, development, biotechnologies, green construction, a priori ranking, phytopathogens.

Поступила 17.05.19 / Received on May 17, 2019

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-63-74

ДИНАМИКА РОСТА И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КУЛЬТУР СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ВЕЙНИКОВО-ЛУГОВИКОВЫХ ВЫРУБКАХ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

О.И. Гаврилова, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](#),

ORCID: [0000-0002-5618-8239](#)

И.В. Морозова, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAG-1937-2019](#),

ORCID: [0000-0002-3972-7843](#)

Ю.В. Ольхин, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [AAF-8800-2019](#),

ORCID: [0000-0002-5946-8252](#)

А.Л. Юрьева, канд. биол. наук; ResearcherID: [AAE-3981-2019](#),

ORCID: [0000-0002-7252-2268](#)

А.О. Иоффе, аспирант; ResearcherID: [AAF-8862-2019](#), ORCID: [0000-0001-6548-6273](#)

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: ogavril@mail.ru, miv12@bk.ru, yuri_olkhin@mail.ru, a_yureva@mail.ru, ana.ioffe@gmail.com

Своевременное и качественное искусственное лесовосстановление служит одним из основных условий устойчивого управления лесами. Цель многолетнего исследования – установить влияние методов лесовосстановления и вида посадочного материала на рост лесных культур сосны обыкновенной в таежной зоне Республики Карелия. Для подтверждения объективности полученных результатов впервые были применены мультитиме-ренные материалы дистанционного зондирования, полученные со спутников серии Landsat и Sentinel. Наличие красного и ближнего инфракрасного каналов в полученных данных позволяет выполнить расчет нормализованного разностного индекса растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который является разностью интенсивностей отраженного света в инфракрасном и красном каналах, деленной на сумму их интенсивностей, и позволяет оценить количество фотосинтетически активной биомассы. Применение этого индекса для изучения динамики лесовозобновления и лесовосстановления представляет научный интерес. Исследование живого напочвенного покрова показало, что доля участия злаков и иван-чая узколистного существенно уменьшилась, доля лесных видов увеличилась. Установлено, что к 2019 г. после создания культур сосны обыкновенной по обработанной почве на вейниково-луговиковой вырубке сформировалось хвойное насаждение I и Ia классов бонитета с запасом не менее 29,2 м³/га.

Для цитирования: Гаврилова О.И., Морозова И.В., Ольхин Ю.В., Юрьева А.Л., Иоффе А.О. Динамика роста и оценка состояния культур сосны обыкновенной на вейниково-луговиковых вырубках методами дистанционного зондирования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 63–74. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-63-74

Ключевые слова: лесные культуры, сосна обыкновенная, посадочный материал, дистанционное зондирование, фотосинтетически активная биомасса, фитомасса, вегетационный индекс, рубка.

Введение

Длительная эксплуатация лесных ресурсов таежной зоны может сопровождаться сменой видового состава после рубки. Поэтому возникает острая потребность в создании хвойных лесных культур из хозяйственно ценных видов растений. В Карелии одной из важных задач является использование разных приемов лесовыращивания для полного восстановления сырьевой базы предприятий лесного комплекса. Ежегодно искусственным путем восстанавливается около 7 тыс. га.

В Республике Карелия 60...70 % лесных культур создается после вырубki лесных массивов относительно высокой продуктивности, в том числе по брусничному и черничному типу лесорастительных условий.

На юге Карелии явно доминирует злаковая группа из общего перечня типов вырубok (57 %). Данная группа рассматривается как основной объект фонда лесовосстановления республики [1, 2, 7, 8, 12, 15].

В течение 19 лет (с 1999 по 2018 г.) проводились детальные исследования роста культур сосны обыкновенной, созданных разными технологическими методами и основными видами посадочного материала на вейниково-луговиковых вырубках, а также динамики изменения в структуре и составе живого напочвенного покрова (ЖНП). В настоящее время широко применяется мониторинг состояния лесного фонда с помощью космической съемки. Для анализа территорий и объектов используют данные с различных спутниковых систем. Для решения широкого круга задач в сфере мониторинга и оценки состояния лесов весьма востребованы данные дистанционного зондирования спутников серий Landsat и Sentinel благодаря открытости и бесплатности, наличию ближнего инфракрасного канала.

Цель многолетнего исследования – установить влияние методов лесовосстановления и вида посадочного материала на рост лесных культур сосны обыкновенной в таежной зоне Республики Карелия с применением данных дистанционного зондирования.

Полученные результаты позволят выявить наиболее перспективные виды посадочного материала и могут стать дополнительной базой для актуализации рекомендаций по лесокультурной деятельности на территории Республики Карелия [16–18, 20, 23].

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в южной Карелии, на территории Пряжинского центрального лесничества на вейниково-луговой вырубке после сплошной рубки сосняка брусничного.

Характеристика объекта: сплошная вырубка 1995 г. общей площадью 6 га, рельеф относительно ровный, почва супесчаная подзолистая иллювиально-железистая. В напочвенном покрове, как правило, встречаются *Calamagrostis arundinaceae* (L.) Roth (35 %), *Avenella flexuosa* (L.) Beauv. (25 %), *Vaccinium myrtillus* L. (20 %), *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. (20 %), *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth (5 %). Единично выявлены такие виды, как *Luzula pilosa* (L.) Willd., *Angelica sylvestris* L., *Solidago virgaurea* L., *Gnaphalium sylvaticum* L., *Calluna vulgaris* (L.) Hull. В микропонижениях отмечены виды рода *Sphagnum*, на значительно уплотненной почве – *Polytrichum commune* L. [24, 26]. Естественное возобновление на вырубке представлено в основном мелколиственными породами: березой пушистой (1650 шт./га; средняя высота 1,7 м), ольхой серой (475 шт./га; 1,0 м), осинкой (400 шт./га; 1,0 м), а также рябиной обыкновенной (200 шт./га; 1,1 м). Кроме того, естественно возобновились ель европейская (425 шт./га; 0,4 м) и сосна обыкновенная (300 шт./га; 0,5 м).

В 1998 г. проведена предварительная обработка почвы полосами шириной 0,8 м с расстоянием между ними 3,5 м покровосдирателем ПДН-1, глубина обработки 10...12 см. Осенью 1998 г. произведены посев и посадка лесных культур вручную. Используются сеянцы Петрозаводского лесного питомника, выращенные из нормальных семян 1-го класса качества, заготовленных на тер-

ритории Прионежского района. Рядовая посадка выращенных в теплице 1-летних сеянцев с закрытой корневой системой (посадочный материал с закрытой корневой системой (ПМЗК)) проводилась посадочной трубой «Поттипутки» с густотой 3,0 тыс. шт./га, 2-летних – из открытого грунта (открытая корневая система (ОКС)) с помощью меча Колесова при густоте 3,5 тыс. шт./га. Посев семян был выполнен в небольшие площадки размером 20×20 см по 20 шт. с расстоянием между подготовленными посевными местами 1 м. Семена 1-го класса качества были заготовлены в Прионежском районе республики.

Для проведения исследования ЖНП на пробных площадях с лесными культурами использовался геоботанический метод трансект [3, 4, 10]. По всей площади вырубki вдоль заложенных трансект по минерализованным полосам закладывались учетные площадки размером 1×1 м². На каждой исследуемой пробной площади – 100 учетных площадок.

В конце каждого сезона вегетации проводилась полная инвентаризация лесных культур сосны обыкновенной для определения приживаемости и сохранности растений [9, 13].

В исследовании состояния и динамики развития лесных культур на территории Пряжинского лесничества использовались материалы мультиспектральной съемки, полученные в 2001, 2006, 2015, 2018 гг. со спутников Landsat 5, Landsat 7 и Sentinel-2A. На сайте геологической службы США (USGS) имеется бесплатный доступ к архивным снимкам спутников серии Landsat. Аппаратура ТМ (Thematic Mapper) спутника Landsat 5 и ЕТМ + (Enhanced Thematic Mapper Plus – усовершенствованный тематический картограф) спутника Landsat 7 позволяет получить данные с пространственным разрешением 30 м. Данные представлены в видимом диапазоне (в синем канале (0,45...0,52 мкм), зеленом – (0,53...0,61 мкм), красном – (0,63...0,69 мкм)), а также ближнем инфракрасном канале (0,78...0,90 мкм). Серия спутников Sentinel является проектом Европейского космического агентства. Оптико-электронный мультиспектральный сенсоркосмический аппарат Sentinel-2A позволяет получить данные с пространственным разрешением 10 м в видимом диапазоне (0,490; 0,560; 0,665 мкм) и в ближнем инфракрасном канале (0,842 мкм). Наличие красного и ближнего инфракрасного каналов в данных, полученных со спутников, дает возможность произвести расчет вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный индекс растительности) и оценить динамику фотосинтетически активной биомассы. Радиометрическая коррекция изображений, расчет NDVI и визуализация тематической карты для территории Пряжинского лесничества выполнены с использованием программного обеспечения Scanex Image Processor [14, 19–22]. С учетом цели данного исследования анализ NDVI проведен для ограниченной площади лесных культур в кв. 46 Пряжинского лесничества.

Результаты исследования и их обсуждение

В течение 19 лет роста лесных культур сосны обыкновенной и однократных рубок ухода осветлением в 2005 г. состав ЖНП существенно изменился. Так, в 2018 г. вейник лесной (*Calamagrostis arundinaceae* (L.) Roth) занимал 15 % площади, луговик извилистый (*Avenella flexuosa* (L.) Beauv.) – 15 %, иван-чай узколистый (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.) – 5 %, брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) – 45 %, черника миртолистная (*Vaccinium myrtillus* L.) – 25 %, кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.) – 15 %, вереск обыкновенный – 15 %.

новенный (*Calluna vulgaris* (L.) Hull) – 5 %; зеленые мхи: плеврозиум Шребера (*Pleurosium schreberi* (Brid.) Mitt.) – 3 %, дикранум метловидный (*Dicranum scoparium* Hedw.) – 3 %, кладония оленья (*Cladonia rangiferina* (L.) Weberex F.H. Wigg.) – 2 %. Доля участия в общем проективном покрытии видового состава ЖНП вырубок в конце сезона вегетации приведена в табл. 1.

Таблица 1

Представленность в общем проективном покрытии (%) основных видов ЖНП на конец сезона вегетации

Вид	Период вегетации			
	2004 г.	2008 г.	2014 г.	2018 г.
<i>Calamagrostis arundinaceae</i> (L.) Roth	40	37	32	15
<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Beauv.	29	28	26	15
<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	29	21	5	4
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	4	10	16	22
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	10	15	20	23
<i>Pleurosium schreberi</i> (Brid.) Mitt.; <i>Dicranum scoparium</i> Hedw.	4	4	5	6
<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weberex F.H. Wigg.	6	5	3	2

Таким образом, доля участия злаков в структуре ЖНП существенно уменьшилась (25 %), иван-чая узколистного – тоже (25 %), в то время как доля лесных видов увеличилась на 13...18 %. Следовательно, с ростом лесопокрытой площади постепенно формируется ЖНП, характерный для лесной среды.

Приживаемость лесных культур сосны обыкновенной, созданных сеянцами с ОКС, в первый год выращивания составила 87 %, сеянцами с ПМЗК и посевом – 100 %, на второй год – соответственно 85, 98 и 100 %. Более низкая приживаемость лесных культур первого года, созданных сеянцами с ОКС, вероятно, связана с некоторым повреждением корневой системы при нарушении правил транспортировки и неправильной посадке. Показатели сохранности лесных культур сосны обыкновенной представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сохранность (%) лесных культур сосны обыкновенной, созданных посевом и посадкой

Метод создания	Год исследования			
	2004 г.	2008 г.	2013 г.	2018 г.
Посев	96	93	82	38
Посадка:				
ОКС	84	81	73	43
ПМЗК	94	93	82	60

Отпад сосны в посадках, как правило, отмечается в первые 3 года жизни. Это связано с наиболее существенными для данного региона неблагоприятными факторами внешней среды, повреждениями, нанесенными энтомофитными факторами, и развитием агрессивной травянистой растительности, что подтверждается и данными других авторов [5, 25]. На исследуемых участках сохранность культур сосны к 19-му году выращивания для посевов составила 38 %, или 1333 шт./га, для посадки сеянцами с ОКС – 43 %, или 1510 шт./га, для посадки сеянцами ПМЗК – 60 %, или 1823 шт./га.

По результатам исследования установлено, что высокой приживаемостью и сохранностью растений при предварительной обработке почвы на вей-

никово-луговиковых вырубках характеризуются лесные культуры сосны обыкновенной, созданные ПМЗК.

Динамика основных показателей роста культур сосны обыкновенной в течение 19 лет исследования представлена в табл. 3.

Таблица 3

**Дендрометрические показатели роста культур сосны,
созданных посевом и посадкой**

Метод создания	Высота, м				Диаметр, см, на высоте 1,3 м			
	2004 г. (5 лет)	2009 г. (10 лет)	2013 г. (14 лет)	2018 г. (19 лет)	2004 г. (5 лет)	2009 г. (10 лет)	2013 г. (14 лет)	2018 г. (19 лет)
Посев	0,57 ± ± 0,06	2,46 ± ± 0,31	4,12 ± ± 0,51	8,70 ± ± 0,48	1,32 ± ± 0,13	2,30 ± ± 0,08	4,95 ± ± 0,24	7,50 ± ± 0,36
Посадка: ОКС ПМЗК	0,72 ± ± 0,17	3,15 ± ± 0,21	4,21 ± ± 0,32	9,30 ± ± 0,55	2,03 ± ± 0,31	4,80 ± ± 0,15	5,30 ± ± 0,62	9,50 ± ± 0,58
	1,35 ± ± 0,11	3,74 ± ± 0,14	5,24 ± ± 0,31	10,0 ± ± 0,62	3,09 ± ± 0,46	5,0 ± ± 0,18	5,96 ± ± 0,48	11,10 ± ± 0,65

Примечание. Данные о диаметре 5-летних лесных культур сосны (2004 г.) приведены для корневой шейки.

Как видно из данных табл. 3, диаметры стволов лесных культур сосны к 19-му году исследования достигли следующих значений: 7,50; 9,50 и 11,10 см (табл. 3).

Рост лесных культур сосны по высоте в ежегодной динамике показан на рис. 1.

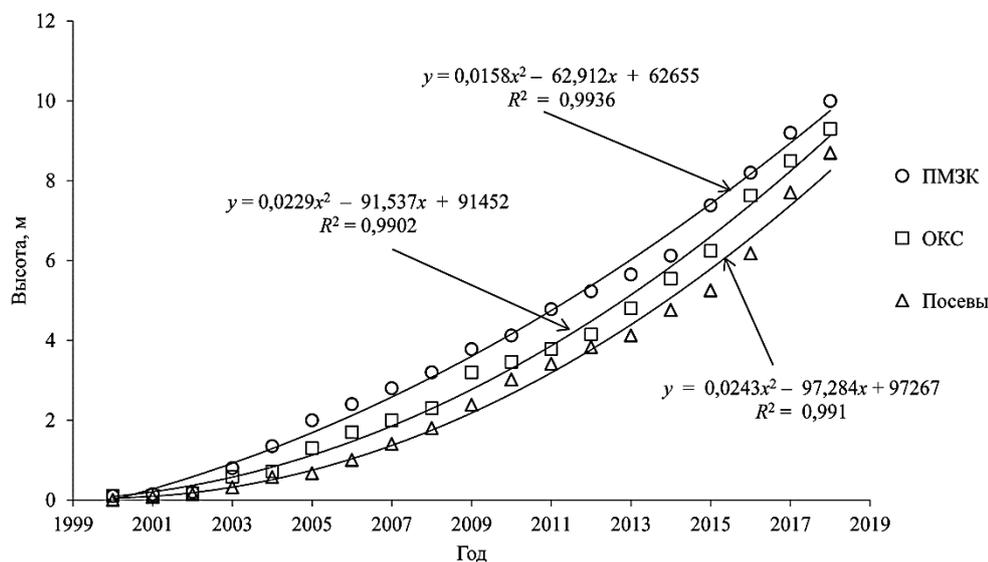


Рис. 1. Ход роста по высоте лесных культур сосны обыкновенной, созданных посевом и посадкой семян с ОКС и ПМЗК

Fig. 1. The growth progress in height of Scots pine forest plantations created by sowing and planting seedlings with bare root system and root-balled system

Так, на протяжении всего периода исследования максимальные показатели роста, приживаемости и сохранности были выявлены у культур сосны обыкновенной, созданных ПМЗК.

Наименьший показатель по NDVI на объекте исследования был отмечен на снимке Landsat 5, полученном 24 июня 2001 г., значение NDVI составило 0,15 (рис. 2, *а, б*), что соответствует участкам минерализованной почвы после обработки. На снимке Landsat 5, полученном 18 июля 2001 г., значение NDVI составило 0,20 (рис. 2, *в, з*). Некоторое повышение значения, вероятно, связано с увеличением фотосинтетически активной биомассы травянистых растений.

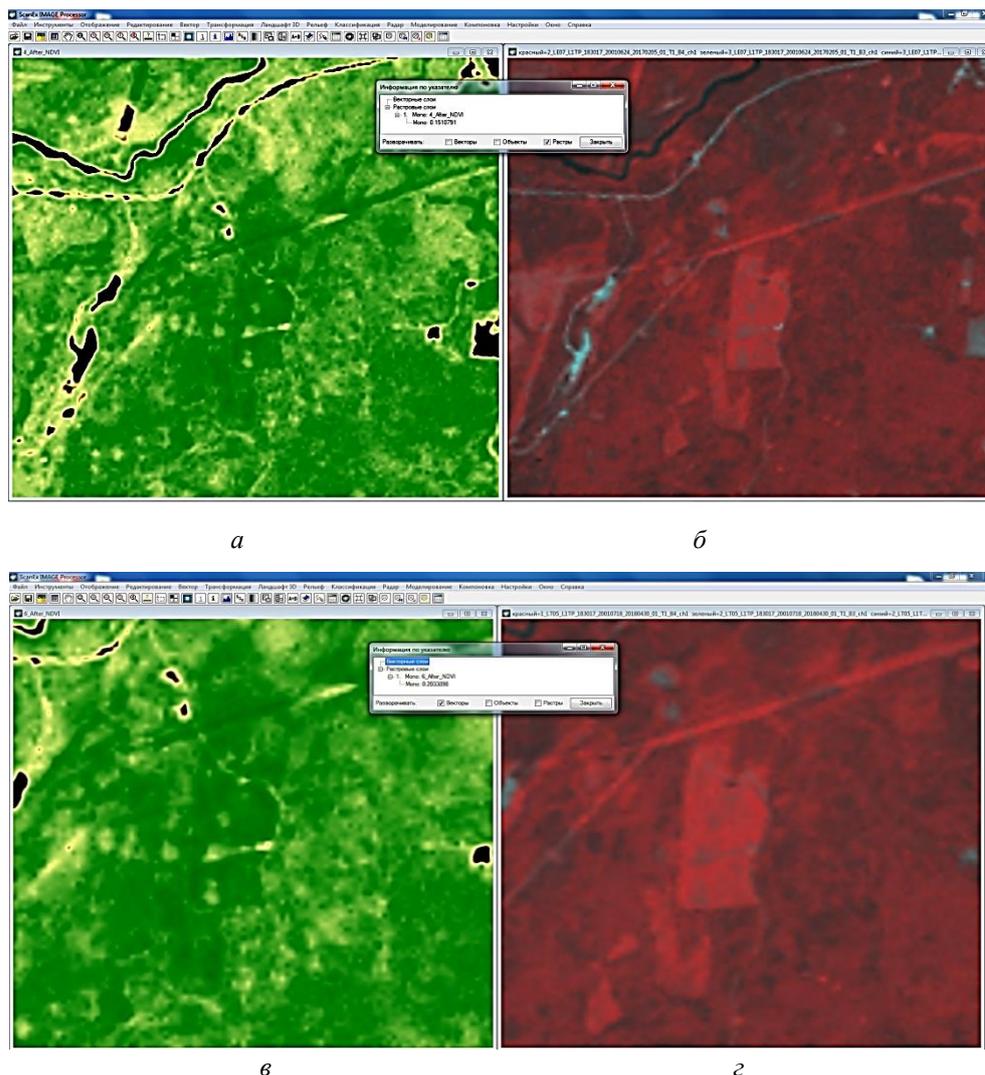


Рис. 2. Распределение NDVI на территории вырубки и лесных массивов в Пряжинском лесничестве: *а, б* – 24.06.2001 г., Landsat 7; *в, з* – 18.07.2001 г., Landsat 5; *а, в* – изображение с рассчитанным индексом NDVI; *б, з* – изображение с синтезом каналов космической съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах

Fig. 2. Distribution of NDVI in the cutting and forest areas in the Pryazhinskoye forest district: *а, б* – on June 24, 2001, Landsat 7; *в, з* – on July 18, 2001, Landsat 5; *а, в* – image with the calculated NDVI; *б, з* – image with the synthesis of satellite imagery channels in the visible and near infrared ranges

Показатель NDVI на объекте исследования 9 июля 2006 г. увеличился до 0,45, что соответствует разреженным хвойным посадкам (рис. 3).

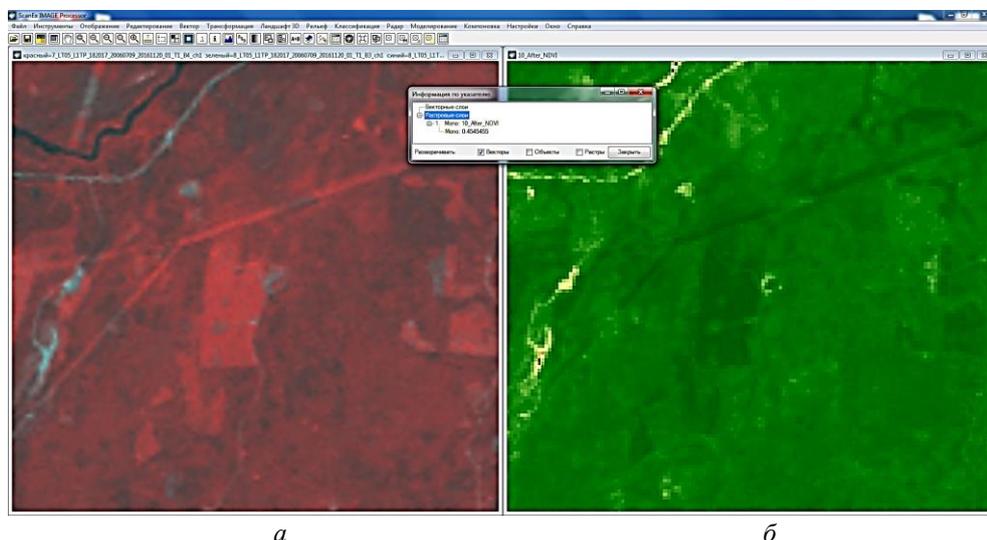


Рис. 3. Распределение NDVI на территории вырубki и лесных массивов в Пряжинском лесничестве (09.07.2006 г., Landsat 5): *a* – изображение с синтезом каналов космической съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах; *б* – изображение с рассчитанным индексом NDVI

Fig. 3. Distribution of NDVI in the cutting and forest areas in the Pryazhinskoye forest district on July 9, 2006, Landsat 5: *a* – image with the synthesis of satellite imagery channels in the visible and near infrared ranges; *b* – image with the calculated NDVI

Динамика показателя NDVI в 2015 г. и 2018 г. была положительной, увеличение индекса составило 0,69 и 0,74 соответственно (рис. 4). Увеличение индекса по сравнению с данными 2001 г. свидетельствует об успешном росте лесных культур и нарастании фотосинтетически активной биомассы.

На изменчивость значения NDVI оказывают влияние многие факторы, например: освещенность и время съемки, состояние атмосферы, тип мультиспектрального сканирующего устройства, фитомасса травянистой растительности. Однако полученные результаты позволяют сделать вывод, что увеличение индекса NDVI на исследованном участке лесных культур сосны обыкновенной косвенно свидетельствует об успешности роста лесных культур, возрастании фитомассы и запаса. Исследователи отмечают, что более высокие показатели NDVI проявляются при большем запасе древесины, а также при увеличении густоты возобновления [6, 11].

В основном к окончанию 5-го периода вегетации созданные минерализованные полосы на злаковых вырубках более активно зарастают *Calamagrostis arundinaceae* (L.) Roth, чем *Avenella flexuosa* (L.) Beauv и *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. Исследованные лесные культуры сосны, созданные способом посадки, а также самые крупные экземпляры из созданных посевом выходят из-под влияния приведенных видов травянистой растительности и не испытывают с их стороны конкуренции.



Рис. 4. Распределение NDVI на территории вырубки и лесных массивов в Пряжинском лесничестве: *а, б* – 18.08.2015, Sentinel-2A; *в, г* – 30.07.2018, Sentinel-2A; *а, в* – изображение с синтезом каналов космической съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах; *б, г* – изображение с рассчитанным индексом NDVI

Fig. 4. Distribution of NDVI in the cutting and forest areas in the Pryazhinskoye forest district: *а, б* – on August 18, 2015, Sentinel-2A; *в, г* – on July 30, 2018, Sentinel-2A; *а, в* – image with the synthesis of satellite imagery channels in the visible and near infrared ranges; *б, г* – image with the calculated NDVI

Заключение

По результатам проведенного многолетнего исследования динамики роста лесных культур сосны обыкновенной, созданных разными методами и с использованием разных видов посадочного материала, было установлено, что наиболее высокая приживаемость и хорошая сохранность в течение первых 5 вегетационных периодов наблюдалась у семян ПМЗК. Успешный рост по

высоте, относительно хорошо развившийся ассимиляционный аппарат и разветвленная корневая система привели к интенсивному накоплению ими биомассы. Это способствовало формированию искусственного хвойного насаждения I и Ia классов бонитета к 19-му году роста. Запас лесных культур сосны обыкновенной, созданных посевом, составил 29,2 м³/га; культур, созданных из 2-летних семян с ОКС, – 56,2 м³/га; культур, созданных посадкой семян ПМЗК, – 92,7 м³/га.

Наиболее перспективным рекомендуемым методом создания культур является ручная посадка сеянцами ПМЗК по обработанной механизированным способом почве. Эти посадки отличаются более высокой конкурентной способностью по отношению к основным агрессивным видам живого напочвенного покрова вырубков, относительно высокой сохранностью растений и ускоренным ростом, что подтверждается материалами дистанционного зондирования.

В соответствии с полученными результатами исследования можно рекомендовать в посадках культур сосны, созданных ПМЗК, исключать агротехнические уходы, так как они в основном не испытывают существенного влияния доминирующих видов живого напочвенного покрова, и переводить их в лесопокрытые земли по высоте с возраста 5–6 лет. Предусмотренное Правилами лесовосстановления [9] снижение густоты лесных культур из сеянцев ПМЗК до 2 тыс. шт./га подтверждено данными нашего исследования, при этом прогнозируемый запас в возрасте 20 лет – не менее 65 м³/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гаврилова О.И. Лесовосстановление вырубков и продуктивность лесных культур хвойных пород Республики Карелия: дис. ... д-ра с.-х. наук. Петрозаводск, 2012. 351 с. [Gavrilova O.I. *Reforestation of Cuts and Forest Crops Fertility in the Republic of Karelia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2012. 351 p.]
2. Гаврилова О.И., Пак К.А., Морозова И.В., Юрьева А.Л. Формирование искусственных основных древостоев в условиях карельской таежной зоны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 23–33. [Gavrilova O.I., Pak K.A., Morozova I.V., Yur'eva A.L. Formation of Artificial Pine Stands in the Karelian Taiga Zone. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 4, pp. 23–33]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.4.23](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.23); URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b55/gavrilova.pdf>
3. Грейг-Смит П. Количественная экология растений. М.: Мир, 1967. 359 с. [Greig Smith P. *Quantitative Plant Ecology*. Moscow, Mir Publ., 1967. 359 p.]
4. Ипатов В.С. Методы описания фитоценоза. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 53 с. [Ipatov V.S. *Phytocenosis Description Methods*. Saint Petersburg, SPbGU Publ., 2000. 53 p.]
5. Крышень А.М. Растительные сообщества вырубков Карелии. М.: Наука, 2006. 262 с. [Kryshen' A.M. *Plant Communities of Karelian Cuts*. Moscow, Nauka Publ., 2006. 262 p.]
6. Курбанов Э.А., Нуреева Т.В., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Мифтахов Т.Ф., Незамаев С.А., Полевщикова Ю.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье // Вестн. МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 17–24. [Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N., Gubayev A.V., Lezhnin S.A., Miftakhov T.F., Nezamayev S.A., Polevshchikova Y.A. Remote Monitoring of Disturbances in Forest Cover, Reforestation and Afforestation of Mari Zavolzhje. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2011, no. 3, pp. 17–24].

7. Мерзленко М.Д., Бабич Н.А., Гаврилова О.И. Введение в экологию хвойных лесных культур: моногр. Архангельск: САФУ, 2018. 379 с. [Merzlenko M.D., Babich N.A., Gavrilova O.I. *Introduction to the Ecology of Coniferous Forest Plantations*: Monograph. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2018. 379 p.].

8. Морозова И.В. Закономерности роста культур сосны в условиях сукцессий растительности на вырубках южной Карелии: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2011. 20 с. [Morozova I.V. *Pine Crops' Growth Regularities in the Conditions of Successions of Plants on the Cuts of Southern Karelia*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2011. 20 p.].

9. Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений: приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 25 марта 2019 г. № 188 (документ с изменениями, внесенными приказом Минприроды России от 14 августа 2019 г. № 546). Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905150009> (дата обращения: 08.11.2019). [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of March 25, 2019, No. 188 "On Approval of the Regulations of Reforestation, Reforestation Project Scope, Procedure for Development of a Reforestation Project and Introduction of Amendments to It"].

10. Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 50 с. [Ogiyevskiy V.V., Khirov A.A. *Inspection and Study of Forest Plantations*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 50 p.].

11. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Опыт использования вегетационных индексов при комплексных исследованиях на объектах гидроресомелиорации // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1(21). С. 33–41. [Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. Experience of Vegetation Indices Use for Complex Researches on the Objects of Hydro and Forest Amelioration. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2014, no. 1(21), pp. 33–41].

12. Соколов А.И. Лесовосстановление на вырубках Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 215 с. [Sokolov A.I. *Reforestation of Cuts in the North-West of Russia*. Petrozavodsk, KRC RAS Publ., 2006. 215 p.].

13. Технические указания по проведению инвентаризации лесных культур, защитных лесных насаждений, питомников, площадей с проведенными мерами содействия естественному возобновлению леса и вводу молодняков в категорию ценных древесных насаждений. М.: ВНИИЦ по лесным ресурсам Госкомлеса СССР, 1990. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9014074> (дата обращения: 08.11.19). [Engineering Instructions for the Inventory of Forest Crops, Protective Forest Plantations, Nurseries, and Areas with Assistance Measures for Natural Forest Regeneration and Introduction of Young Growth into the Category of Valuable Tree Stands. Moscow, All-Union Research and Information Center for Forest Resources of the USSR State Committee for Forestry, 1990].

14. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика (Geomatics). 2009. № 3(4). С. 28–32. [Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral Properties of Plants and Vegetation Indexes. *Geomatika* [Geomatics], 2009, no. 3(4), pp. 28–32].

15. Юрьева А.Л. Рост и развитие лесных культур сосны в экосистеме вейниково-луговиковых вырубок Карелии: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2007. 23 с. [Yureva A.L. *Growth and Development of Pine Forest Crops in Karelian Reed-grass Meadow Cuts Ecosystem*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Petrozavodsk, 2007. 23 p.].

16. Aleksandrowicz-Trzcńska M., Drozdowski S., Wołczyk Z., Bielak K., Zybura H. Effects of Reforestation and Site Preparation Methods on Early Growth and Survival of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in South-Eastern Poland. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 11, art. 421. DOI: [10.3390/f8110421](https://doi.org/10.3390/f8110421)

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

18. De Chantal M., Leinonen K., Ilvesniemi H., Westman C.J. Effects of Site Preparation on Soil Properties and on Morphology of *Pinus silvestris* and *Picea abies* Seedlings Sown at Different Dates. *New Forests*, 2004, vol. 27, pp. 159–173. DOI: [10.1023/A:1025042632491](https://doi.org/10.1023/A:1025042632491)

19. Demina N.A., Karpov A.A., Voronin V.V., Lopatin E.V., Bogdanov A.P. Possible Use of Remote Sensing for Reforestation Processes in Arctic Zone of European Russia. *Arctic Environmental Research*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 106–113. Available at: <https://rucont.ru/efd/647065> (accessed 28.05.19).

20. Heiskanen J., Mäkitalo K., Hyvönen J. Long-Term Influence of Site Preparation on Water-Retention Characteristics of Forest Soil in Finnish Lapland. *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 241, iss. 1-3, pp. 127–133. DOI: [10.1016/j.foreco.2007.01.023](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.023)

21. Iverson L.R., Graham R.L., Cook E.A. Applications of Satellite Remote Sensing to Forested Ecosystems. *Landscape Ecology*, 1989, vol. 3, no. 2, pp. 131–143. DOI: [10.1007/BF00131175](https://doi.org/10.1007/BF00131175)

22. Koch B. The Contribution of Remote Sensing for Afforestation and Forest Biodiversity Assessment. *Proceedings of the Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring, June 1–3, 1999, Rogow, Poland*. Rogow, Warsaw Agricultural University, Faculty of Forestry, 2000, pp. 3–13.

23. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, iss. 5-6, pp. 825–848. DOI: [10.1007/s11056-012-9332-x](https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x)

24. Müller J., Bolte A., Beck W., Anders S. Bodenvegetation und Wasserhaushalt von Kiefernforstökosystemen (*Pinus sylvestris* L.) [Ground Vegetation and Water Budget of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Forest Ecosystems]. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*, 1998, B. 28, S. 407–414.

25. Pardos M., Montes F., Aranda I., Cañellas I. Influence of Environmental Conditions on Germinant Survival and Diversity of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Central Spain. *European Journal of Forest Research*, 2007, vol. 126, iss. 1, pp. 37–47. DOI: [10.1007/s10342-005-0090-6](https://doi.org/10.1007/s10342-005-0090-6)

26. Tilk M., Mandre M., Klõšeiko J., Kõresaar P. Ground Vegetation under Natural Stress Conditions in Scots Pine Forests on Fixed Sand Dunes in Southwest Estonia. *Journal of Forest Research*, 2011, vol. 16, iss. 3, pp. 223–227. DOI: [10.1007/s10310-011-0282-5](https://doi.org/10.1007/s10310-011-0282-5)

GROWTH DYNAMICS AND STATUS ASSESSMENT OF SCOTS PINE CROPS ON REEDGRASS MEADOW CUTS BY REMOTE SENSING TECHNIQUES

O.I. Gavrilova, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),
ORCID: [0000-0002-5618-8239](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239)

I.V. Morozova, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAG-1937-2019](https://orcid.org/0000-0002-3972-7843),
ORCID: [0000-0002-3972-7843](https://orcid.org/0000-0002-3972-7843)

Yu.V. Olkhin, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAF-8800-2019](https://orcid.org/0000-0002-5946-8252),
ORCID: [0000-0002-5946-8252](https://orcid.org/0000-0002-5946-8252)

A.L. Yureva, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAE-3981-2019](https://orcid.org/0000-0002-7252-2268),
ORCID: [0000-0002-7252-2268](https://orcid.org/0000-0002-7252-2268)

A.O. Ioffe, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAF-8862-2019](https://orcid.org/0000-0001-6548-6273),
ORCID: [0000-0001-6548-6273](https://orcid.org/0000-0001-6548-6273)

Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: ogavril@mail.ru, miv12@bk.ru, yuri_olkhin@mail.ru, a_yureva@mail.ru, ana.ioffe@gmail.com

Well-timed and high-quality artificial reforestation is one of the main factors of sustainable forest management. Efficient forest stand formation is influenced by the right choice of the reforestation method and efficient planting material species. Longstanding research of pine crops' growth in the taiga zone of the Republic of Karelia was held according to the conventional methods. In order to confirm the objectivity of the obtained research results multi-time materials of remote sensing taken from the satellites of Landsat and Sentinel series were used for the first time. The presence of red and near infrared channels in the received data allows to calculate NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), which gives the opportunity to estimate the photosynthetic active biomass. The index is the difference between the reflected intensities in infrared and red channels divided by the sum of its intensities. The use of NDVI for the study of reforestation dynamics is of research interest. Forest live cover analysis has shown that the quota of cereals and fireweed has essentially decreased, while the quota of forest species has increased. It was found that the coniferous stand of the I and Ia quality classes with the stock not fewer than 29.2 m³/ha has developed after Scots pine crops' formation on the cultivated land of reedgrass meadow cuts by 2019.

For citation: Gavrilova O.I., Morozova I.V., Olkhin Yu.V., Yureva A.L., Ioffe A.O. Growth Dynamics and Status Assessment of Scots Pine Crops on Reedgrass Meadow Cuts by Remote Sensing Techniques. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 63–74. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-63-74

Keywords: forest crops, Scots pine, planting material, remote sensing, photosynthetically active biomass, phytomass, vegetation index, cut.

Поступила 28.05.19 / Received on May 28, 2019

УДК 630*182.47:581.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-75-87

ОЦЕНКА КОМПОНЕНТОВ НИЖНИХ ЯРУСОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ БЕРЕЗНЯКАХ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

И.А. Гончарова^{1, 2}, канд. биол. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAF-6890-2019](#),
ORCID: [0000-0002-3495-9979](#)

*Л.Н. Скрипальщикова*¹, канд. биол. наук, доц., ст. науч. сотр.;
ResearcherID: [AAF-7714-2019](#), *ORCID*: [0000-0003-2294-497X](#)

*А.П. Барченков*¹, канд. биол. наук, науч. сотр.; *ORCID*: [0000-0003-3964-480X](#)

А.С. Шущпанов^{1, 3}, канд. биол. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [P-9468-2016](#),
ORCID: [0000-0003-3833-5730](#)

¹Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, Академгородок, 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: iagoncharova007@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, alexbarchenkov@mail.ru, shushpanov.as@ksc.krasn.ru

²КГБУК «Красноярский краевой краеведческий музей», ул. Дубровинского, д. 84, г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: iagoncharova007@mail.ru

³Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, проп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; e-mail: shushpanov.as@ksc.krasn.ru

Изучены характеристики современного состояния нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных березняках Красноярской лесостепи, длительное время подвергающихся рекреационному и техногенному воздействиям, а также степени и характера его изменения за 12-летний период, прошедший с момента последних исследований. Объекты расположены на мониторинговых пробных площадях, заложенных в разнотравных березняках V-VI классов возраста, II-IV классов бонитета, полнотой 0,6–0,9, произрастающих в зоне Красноярской лесостепи в направлении основного переноса промышленных выбросов г. Красноярск. Фитоценозы длительное время подвергались значительным техногенным и рекреационным нагрузкам. На каждом объекте было заложено по 30 учетных площадок размером 1 м², где проведена оценка видового состава, горизонтальной и вертикальной структуры, проективного покрытия и встречаемости видов подлеска и живого напочвенного покрова. Для сравнительного анализа флористических списков применен коэффициент Серенсена–Чекановского. Степень видового разнообразия оценена с помощью индекса Шеннона, степень рекреационной трансформации – индекса синантропизации. Для учета запаса фитомассы живого напочвенного покрова на каждой пробной площадке взяты укосы с 10 учетных площадок размером 20 × 25 см. Влияние рекреационных нагрузок изучали с применением оценочных шкал дигрессии, степень техногенной нагрузки – по содержанию токсичных ингредиентов в растениях живого напочвенного покрова. Установлено, что на момент исследований концентрации токсичных элементов в растениях не достигали избыточных значений, при которых происходит нарушение гомеостаза. Сделан вывод, что изменения в растительном покрове, отмеченные в 2017 г. по отношению к состоянию на 2005 г., в большей мере обусловлены рекреационной, нежели техногенной, нагрузкой, изменившейся в связи с внедрением на АО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод» новой технологии, позволившей снизить объемы токсичных промышленных выбросов. По итогам исследования определен видовой состав подлеска и живого напочвенного покрова, выявлены особенности его изменения за 12-летний период. На всех объектах отмечены снижение видового разнообразия и увеличение доли синантропных видов. Для каждого объекта определены общие запасы фитомассы

живого напочвенного покрова и запасы фитомассы отдельных видов. Установлены закономерности изменения вклада различных видов в общий запас фитомассы в зависимости от изменения рекреационной нагрузки. На основе анализа изменения видового разнообразия, количественного соотношения эколого-ценотических групп, структуры и абсолютного значения запаса фитомассы установлены стадии рекреационной дигрессии напочвенного покрова.

Для цитирования: Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П., Шушпанов А.С. Оценка компонентов нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных березняках Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 75–87. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-75-87

Финансирование: Работа выполнена в рамках базовых проектов фундаментальных исследований Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Биоразнообразие коренных хвойных и производных лесных экосистем» (№ 0356-2016-0301), «Динамика лесов Сибири в меняющемся климате. Мониторинг жизненного состояния, продуктивности и ареалов основных лесобразующих видов древесных растений» (№ 0356-2018-0739).

Ключевые слова: Красноярская лесостепь, березняки, травяно-кустарничковый ярус, видовой состав, антропогенные факторы, запас фитомассы.

Введение

Березняки являются зональным элементом растительного покрова Красноярской лесостепи. Они образуют небольшие массивы (колки) в условиях повышенного увлажнения на склонах северной экспозиции, в западинах, ложках, долинах рек и других понижениях рельефа [1]. Значение березняков многообразно: средозащитное, водорегулирующее, мелиоративное, санитарно-гигиеническое, рекреационное и др. Находясь в зоне влияния крупных городов, все ярусы фитоценоза подвержены сильному антропогенному воздействию, наибольшую роль в котором играют техногенное загрязнение и интенсивная рекреационная нагрузка [16–19, 23]. Отмечено [20–22], что из-за своих небольших размеров березовые фитоценозы лесостепных зон могут утратить способность адаптироваться к изменениям окружающей среды, вызванным антропогенными факторами.

В связи с этим возникает необходимость мониторинга состояния березовых фитоценозов и, в частности, растительного покрова, как одного из наиболее уязвимых их компонентов, что обуславливает актуальность исследования.

Цель данной работы – изучить современное состояние нижних ярусов растительного покрова нарушенных березняков Красноярской лесостепи, длительное время подвергающихся рекреационному и техногенному воздействию, а также оценить степень и характер его изменения за 12-летний период, прошедший с момента последних исследований.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на мониторинговых пробных площадях (ПП), заложенных в березняках (*Betula pendula* Roth) разнотравных V-VI классов возраста, II-IV классов бонитета, полнотой 0,6–0,9 (табл. 1), произрастающих в зоне Красноярской лесостепи.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационные характеристики березовых насаждений

ПП	Состав древостоя, тип леса	Средние		Класс бонитета	Класс возраста	Полнота древос- стоя
		высота, м	диаметр, см			
1	10Б, злаково- разнотравный	16,1	15,4	IV	V	0,8
2	10Б+С, разнотравно- злаковый	23,4	14,2	III	V	0,7
3	10Б, разнотравно- злаковый	23,1	17,0	III	VI	0,6
4	10Б+С разнотравно- осоковый	20,5	17,0	II	V	0,9

ПП заложены по общепринятым методикам [2, 10] в 10...30 км от г. Красноярска (рис. 1) в направлении основного переноса промышленных выбросов города. Фитоценозы длительное время подвергались значительным техногенным и рекреационным нагрузкам. По данным [6], в 2016–2017 гг. в атмосферу г. Красноярска и прилегающих территорий от стационарных источников поступило 196,9 тыс. т загрязняющих веществ, от передвижных – 127,3 тыс. т. В загрязняющих атмосферу выбросах преобладают твердые (тяжелые металлы, фториды) и газообразные (оксиды серы, азота и углерода) вещества.

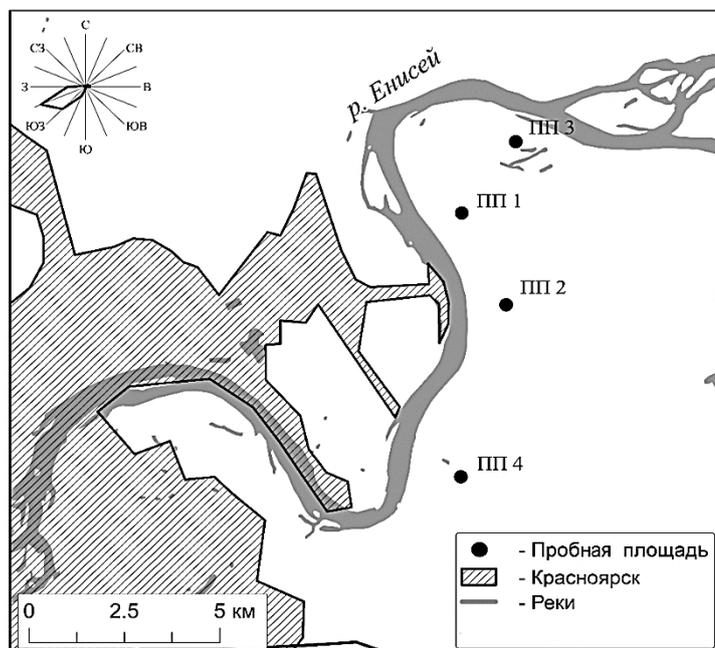


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей

Fig. 1. Map layout of the sample plots

Для изучения напочвенного покрова (август 2017 г.) в березовых фитоценозах в пределах каждой ПП было заложено по 30 учетных площадок размером 1 м², где проводили оценку видового состава, проективного покрытия и встречаемости видов подлеска и живого напочвенного покрова по общепринятым методикам. Классификация эколого-ценотических групп (ЭЦГ) видов осуществлена по Д.И. Назимовой и др. [9] и Т.Н. Буториной [3]. Для сравнительной оценки флористических списков применен коэффициент Серенсена–Чекановского (K_{sc}). Степень видового разнообразия определена с помощью индекса Шеннона, степень рекреационной трансформации – индекса синантропизации [5]. Для учета запаса фитомассы травяно-кустарничкового покрова на каждой пробной площади взяты укосы с 10 учетных площадок размером 20 × 25 см. Растения срезали на уровне подстилки, разбирали по видам, высушивали до абсолютно сухого состояния и взвешивали.

Влияние рекреационных нагрузок изучали с применением оценочных шкал дигрессии [14].

Степень техногенной нагрузки устанавливали по содержанию токсичных элементов (цинк, свинец, кадмий, фтор) в растениях живого напочвенного покрова (средний образец), которое определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Красноярский» с использованием сертифицированных методик. Статистический анализ данных проводили в программе Excel.

ПП 1 (березняк злаково-разнотравный) расположена на надпойменной террасе р. Енисей и примыкает к автомобильной дороге. Участок подвержен сильному антропогенному воздействию. Отмечены следы рекреационного влияния, сенокоса. Характер произрастания древостоя куртинный. Подлесок как ярус не выражен, единично отмечены: *Cotoneaster melanocarpus* Fisch. ex Blytt (высота 50...60 см), *Rosa majalis* Herzm. (30...50 см), *Spiraea chamaedryfolia* L. (30...40 см). Общее проективное покрытие напочвенного покрова составляет 95 %. Доминантами и содоминантами являются *Vicia unijuga* A. Braun, *V. amoena* Fisch., *Lathyrus pratensis* L., *Artemisia tanacetifolia* L. Травяно-кустарничковый ярус разделен на 2 подъяруса: первый (высота 70...90 см) представлен *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *C. arundinacea* (L.) Roth, *Saussurea controversa* DC.; второй (высота 30...50 см) – *Artemisia incana* (L.) Druce, *A. tanacetifolia*, *Vicia unijuga*. Структура фитоценоза относительно однородная, микроассоциации не выделяются. Мохово-лишайниковый ярус отсутствует.

ПП 2 (березняк с сосной разнотравно-злаковый) расположена на выровненной поверхности. Нанорельеф не выражен. Участок подвержен рекреационному воздействию, развита тропинопочная сеть. Подлесок (проективное покрытие 30 %) равномерно размещен по ПП, разделен на 2 подъяруса: первый (высота 1,2...2,0 м) представлен *Cotoneaster melanocarpus*, *Crataegus sanguinea* Pall., *Malus baccata* (L.) Borkh., *Viburnum opulus* L.; второй (высотой 0,5...0,7 м) – *Rosa acicularis* Lindl. Общее проективное покрытие напочвенного покрова составляет 80 %. Степень задерненности 50 %. Доминируют и содоминируют *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Thalictrum minus* L., *Vicia unijuga*. Травяно-кустарничковый ярус разделен на 2 подъяруса: первый, образованный *Elytrigia repens*, *Thalictrum minus*, *Agrimonia pilosa* Ledeb., достигает высоты 100 см, второй (высота 20...30 см) представлен *Fragaria viridis* (Duchesne) Weston, *Rubus saxatilis* L., *Lathyrus pratensis*. Горизонтальная структура фитоценоза не выражена. Мохово-лишайниковый покров отсутствует.

ПП 3 (березняк разнотравно-злаковый). Микрорельеф бугристо-западинный. На ПП отмечены следы рекреационного воздействия. Характер произрастания древостоя куртинный. Подлесок с проективным покрытием 10...20 % по ПП размещен неравномерно (куртинами) и разделен на 2 подъяруса: первый (высота 2,5...3,0 м) имеет следующий видовой состав: *Salix caprea* L., *Padus avium* Mill., *Swida alba* (L.) Opiz, *Viburnum opulus*; второй (высота 0,8...1,0 м) представлен одним видом: *Rosa acicularis*. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса 90 %. Степень задерненности почвы 70 %. Структура фитоценоза неоднородная, выделяются 3 микроассоциации:

высокотравная (доминанты: *Urtica dioica* L., *Cannabis sativa* L., *Centaurea scabiosa* L.) высотой 110...150 см; отмечена вдоль дорог и в западинах с избыточным увлажнением; занимает 10 % ПП;

разнотравная (доминанты: *Geranium sylvaticum* L., *G. pratense* L., *Phlomis tuberosa* (L.) Moench) высотой 50...70 см; занимает 40 % ПП;

злаково-осоковая (доминанты: *Elytrigia repens*, *Carex obtusata* Lilj., *C. macroura* Meinsh.) высотой 50...90 см; занимает 50 % ПП.

Мохово-лишайниковый ярус отсутствует.

ПП 4 (березняк с сосной разнотравно-осоковый). Первый ярус – 10Б+С, второй – 10С. Участок расположен на выровненной поверхности, примыкает к сельскохозяйственным полям, подвержен высокой рекреационной нагрузке. Сильно развита дорожно-тропиночная сеть. Подлесок как ярус не выражен, представлен отдельными экземплярами *Rosa acicularis*, *Spiraea chamaedryfolia*, *Padus avium*, *Crataegus sanguinea*, *Malus baccata*, *Syringa josikaea* J. Jacq. ex Reichenb., *Cotoneaster melanocarpus*, *Swida alba*. Общее проективное покрытие напочвенного покрова достигает 80 %. Степень задерненности почвы 60 %. Травяно-кустарничковый ярус разделен на 2 подъяруса: первый (высота 50...70 см) состоит из *Vicia unijuga*, *Calamagrostis arundinacea*, *Cimicifuga foetida* L., *Geranium sylvaticum*; второй (высота 15...25 см) – из *Lathyrus humilis* (Ser.) Spreng., *Carex macroura* и др. Структура фитоценоза относительно неоднородная, выделяются 2 микроассоциации:

разнотравно-злаковая, занимающая 10 % ПП в виде узкой полосы вдоль сельскохозяйственных полей;

разнотравно-осоковая, занимающая 90 % ПП.

Мохово-лишайниковый ярус представлен в виде отдельных пятен *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt с проективным покрытием не более 3 %.

На ПП отмечены 2 клона *Cypripedium calceolus* L., занесенного в Красную книгу Красноярского края [8].

Результаты исследования и их обсуждение

В 2005 г. в изучаемых березовых ценозах было зафиксировано: 2 вида древесных растений, 9 видов кустарников, 92 вида травяно-кустарничкового яруса, 1 вид мха. В 2017 г. исследования показали наличие в видовом составе 2 видов растений древесного яруса, 11 видов кустарников, 95 видов травяно-кустарничкового яруса, 1 вида мха. Наибольшие изменения в флористическом составе за истекшие 12 лет произошли на ПП 3 ($K_{sc} = 0,79$), наименьшие – на ПП 4 ($K_{sc} = 0,86$) (табл. 2).

Таблица 2

**Характеристика напочвенного покрова
в 2005 г. (числитель) и 2017 г. (знаменатель)**

Показатель	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 4
Коэффициент Серенсена–Чекановского*	0,81	0,81	0,79	0,86
Индекс Шеннона	$\frac{3,33}{2,93}$	$\frac{3,82}{2,96}$	$\frac{3,37}{3,34}$	$\frac{3,36}{2,60}$
Индекс синантропизации	$\frac{9,8}{11,9}$	$\frac{12,3}{16,7}$	$\frac{21,4}{32,7}$	$\frac{5,0}{6,9}$
Стадия дигрессии	$\frac{II}{III}$	$\frac{II}{II}$	$\frac{III}{III}$	$\frac{IV}{III}$

*Коэффициент Серенсена–Чекановского показывает сходство видового состава между 2005 и 2017 г.

Сравнительный анализ данных на ПП 1 показал снижение индекса Шеннона (с 3,33 до 2,93) при одновременном увеличении индекса синантропизации (с 9,8 до 11,9) за 12 лет, прошедшие со времени предыдущего исследования. В видовом составе напочвенного покрова произошли следующие изменения: снизили свое проективное покрытие и встречаемость (вплоть до исчезновения) виды, относящиеся к эколого-ценотической группе лугового и лугово-лесного разнотравья (*Lathyrus pratensis*, *Vicia amoena*, *Campanula glomerata* L., *Iris ruthenica* Ker Gawl.) и к лесостепной группе (*Fragaria viridis*, *Adenophora liliifolia* (L.) A. DC., *Anemone sylvestris* L.), одновременно увеличились проективное покрытие и встречаемость злаков (*Calamagrostis epigeios*, *Elytrigia repens*). Это свидетельствует о том, что малоустойчивые к уплотнению почвы и имеющие хрупкие надземные органы и поверхностную корневую систему лесные и луговые виды сменяются относительно устойчивыми к уплотнению почвы злаками. Согласно шкале рекреационной трансформации растительных сообществ [11], данный фитоценоз, находившийся в 2005 г. на начальной фазе стадии слабой рекреационной трансформации, на момент исследований в 2017 г. относится уже к заключительной фазе той же стадии.

Одним из ведущих показателей, характеризующих фитоценоз, является продуктивность напочвенного покрова. Изучение количественных и качественных характеристик фитомассы – составная часть исследований биологической продуктивности как в биогеоценотическом, так и в ресурсоведческом аспектах [15]. Запасы фитомассы живого напочвенного покрова в исследуемом березовом ценозе достоверно не изменились ($p > 0,05$), составляя в 2005 и 2017 г. соответственно $200,78 \pm 70,90$ и $360,70 \pm 104,13$ г/м² (рис. 2).

Однако структура фитомассы подверглась изменению за истекший период времени (табл. 3). Доля устойчивых и относительно устойчивых к уплотнению почвы видов (*Calamagrostis arundinacea*, *Geum rivale* L., *Carex macroura*, *Artemisia tanacetifolia*, *Elytrigia repens*) увеличилась ($p < 0,05$), при этом доля малоустойчивых к уплотнению почвы видов (*Vicia unijuga*, *Geranium sylvaticum*) сократилась.

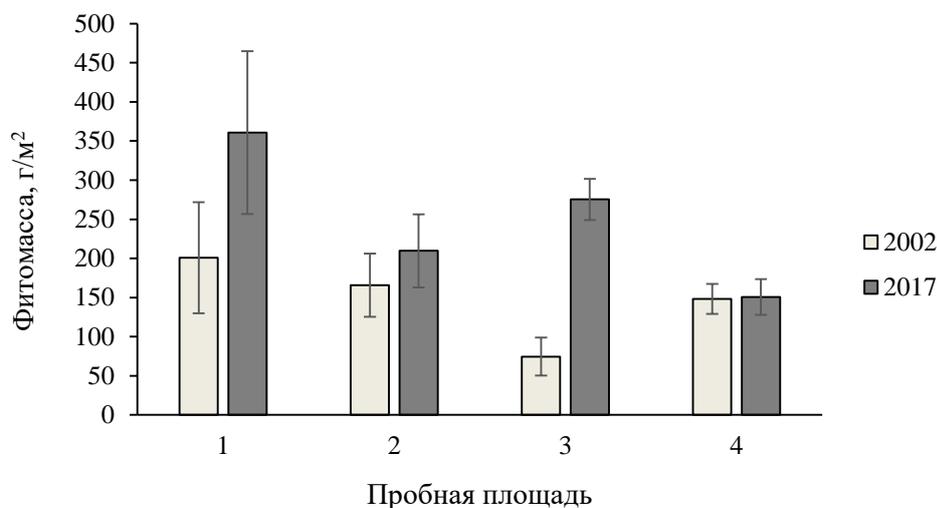


Рис. 2. Общий запас фитомассы напочвенного покрова в березовых ценозах

Fig. 2. The total stock of soil cover phytomass in birch cenoses

Все перечисленное выше позволяет предположить, что на изучаемой территории происходит дальнейшая деградация напочвенного покрова под влиянием возросшей рекреационной нагрузки. Степень рекреационной дигрессии на ПП 1 за 12 лет, прошедших со времени предыдущего исследования в 2005 г., изменилась со II на III.

На ПП 2 проективное покрытие и встречаемость основных доминантных видов не изменились, хотя индекс Шеннона сократился (с 3,82 до 2,96), а индекс синантропизации возрос (с 12,3 до 16,7). Зафиксировано наличие некоторых второстепенных видов, не отмеченных ранее и относящихся к лугово-лесным видам (*Trifolium pratense* L., *Thalictrum foetidum* L.), одновременно выявлено снижение проективного покрытия и встречаемости (до полного исчезновения) других лугово-лесных видов (*Potentilla bifurca* L., *Medicago falcata* L., *Euphorbia pilosa* L.). Данный фитоценоз продолжает находиться на заключительной фазе стадии слабой рекреационной трансформации.

Запасы фитомассы на ПП 2 за исследуемый период изменились не существенно (с $165,68 \pm 40,3$ до $209,7 \pm 46,78$ г/м²). В структуре запасов фитомассы доля синантропных видов (*Achillea millefolium* L., *Agrimonia pilosa*) не изменилась. Вклад таких видов, как *Calamagrostis arundinacea*, *Thalictrum minus*, *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv., относительно устойчивых к уплотнению почвы, увеличился, тогда как вклад других относительно устойчивых к уплотнению почвы видов (*Carex macroura*, *Artemisia glauca* Pall. ex Willd.) сократился, что может свидетельствовать об адаптации фитоценоза к антропогенной нагрузке. ПП 2 в 2017 г., как и в 2005 г., имеет II стадию рекреационной дигрессии.

На ПП 3 в 2017 г. по сравнению с 2005 г. отмечено существенное изменение видового состава травяно-кустарничкового яруса в основном за счет внедрения синантропных видов (индекс синантропизации возрос с 21,4 до 32,7). Снизил свое проективное покрытие виды группы лугового и лугово-лесного разнотравья (*Rubus saxatilis*, *Fragaria viridis*, *Galium boreale* и др.).

Таблица 3

Фитомасса наиболее продуктивных видов растений напочвенного покрова (г/м²) и их доля (%) от общей фитомассы напочвенного покрова в 2002 (числитель) и 2017 гг. (знаменатель)

Вид	ПП 1		ПП 2		ПП 3		ПП 4	
	Фитомасса	Доля	Фитомасса	Доля	Фитомасса	Доля	Фитомасса	Доля
<i>Achillea millefolium</i>	–	–	1,78 6,20	1,1 1,0	0,06 35,00	0,1 3,5	–	–
<i>Agrimonia pilosa</i>	0,40 6,80	0,2 0,6	4,32 17,90	2,7 2,9	0,32 33,60	0,4 3,7	0,96 46,40	0,7 13,0
<i>Artemisia glauca</i>	–	–	15,46 12,40	9,7 2,0	–	–	–	–
<i>Artemisia tanacetifolia</i>	3,84 88,00	1,9 7,6	–	–	0,28 82,20	0,4 8,2	–	–
<i>Brachypodium pinnatum</i>	27,80 157,60	13,8 13,6	1,76 75,60	1,1 12,1	–	–	2,26 3,00	1,5 0,8
<i>Calamagrostis arundinacea</i>	24,18 227,00	12,0 19,6	0,74 109,60	0,5 17,5	1,08 162,60	1,5 16,3	27,58 70,00	18,7 19,6
<i>Carex macrogoua</i>	1,52 59,20	0,8 5,1	46,10 20,80	28,8 3,3	0,28 87,50	0,4 8,8	57,74 82,80	39,1 23,2
<i>Elytrigia repens</i>	19,12 234,80	9,5 20,2	18,96 34,80	11,8 5,6	6,62 107,46	9,0 10,8	14,62 10,20	9,9 2,9
<i>Geranium sylvaticum</i>	8,78 3,20	4,4 0,3	0,32 13,80	0,2 2,2	1,40 1,80	1,9 0,2	–	–
<i>Geum rivale</i>	0,36 96,80	0,2 8,3	–	–	7,42 85,20	10,1 8,5	–	–
<i>Polygonatum odoratum</i>	–	–	–	–	–	–	1,08 10,40	0,7 2,9
<i>Thalictrum minus</i>	1,54 20,00	0,8 1,7	5,12 17,30	3,2 27,7	0,10 86,20	0,1 8,6	4,32 10,00	2,9 20,8
<i>Urtica dioica</i>	–	–	–	–	0,14 111,40	0,2 11,2	–	–
<i>Vicia unijuga</i>	34,08 135,80	17,0 11,6	12,58 76,90	7,9 12,3	–	–	1,56 11,40	1,1 5,2
<i>Viola mirabilis</i>	–	–	0,10 0,60	0,1 0,1	6,16 1,80	8,4 0,2	1,42 8,80	0,9 2,9

Одновременно с этим увеличилось проективное покрытие *Festuca pratensis* Huds. и *Achillea millefolium*, т. е. видов, относительно устойчивых к уплотнению почвы. В напочвенном покрове появились виды, не отмеченные ранее: *Cannabis sativa*, *Convolvulus arvensis* L., *Linaria vulgaris* Mill., *Arctium tomentosum* Mill., *Berteroa incana* (L.) DC., *Cirsium setosum* (Willd.) Besser. Все они относятся к представителям синантропной растительности. Фитоценоз на ПП 3, находившийся в 2005 г. на начальной фазе стадии умеренной рекреационной трансформации, в 2017 г. относится уже к заключительной фазе стадии умеренной трансформации.

Запасы фитомассы на ПП 3 за 12-летний период возросли в 3 раза ($p < 0,05$). В структуре запасов фитомассы увеличили свой вклад виды, относительно устойчивые к уплотнению почвы (*Calamagrostis arundinacea*, *Urtica dioica*, *Carex macrourea*, *Thalictrum minus*, *Agrimonia pilosa*, *Artemisia tanacetifolia*). Ослабление конкуренции со стороны других видов привело к тому, что многие экземпляры вышеперечисленных видов отличались увеличенными размерами. Одновременно с этим снизилась доля малоустойчивых к уплотнению почвы видов (*Viola mirabilis*, *Geranium sylvaticum*).

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что рекреационная нагрузка за последние 12 лет значительно возросла. Известно [12], что при длительном воздействии антропогенного фактора в фитоценозе наступает фаза адаптации, когда растения могут увеличивать биомассу, интенсивность роста и размножения, что и наблюдается на ПП 3. Несмотря на это, данный фитоценоз находится на III стадии дигрессии, как и в 2005 г., чему, вероятно, способствовало снижение техногенного воздействия.

На ПП 4 по сравнению с предыдущими исследованиями 2005 г. отмечено снижение видового разнообразия (индекс Шеннона сократился с 3,36 до 2,60) при одновременном увеличении индекса синантропизации (с 5,0 до 6,9). Исходя из количества синантропных видов, в 2017 г. фитоценоз находится на начальной фазе стадии слабой рекреационной трансформации (как и в 2005 г.). Проектное покрытие и встречаемость основных доминантных видов не изменились, зафиксировано появление видов, относящихся к различным ЭЦГ и не отмеченных ранее (*Cypripedium calceolus*, *Centaurea scabiosa*, *Rubus saxatilis*, *Allium ramosum* L., *Medicago sativa*, *Lupinaster pentaphyllus* Moench, *Adenophora liliifolia* (L.) A. DC.).

Запасы фитомассы за исследуемый 12-летний период на ПП 4 не изменились. В структуре запасов фитомассы отмечены следующие изменения: доля видов, малоустойчивых к уплотнению почвы (*Viola mirabilis*, *Polygonatum odoratum*) увеличилась, доля ряда видов, относительно устойчивых к уплотнению почвы, сократилась (*Elytrigia repens*, *Carex macrourea*), тогда как другие виды, относящиеся к той же группе (*Calamagrostis arundinacea*, *Thalictrum minus*), сохранили свой вклад.

Все вышеизложенное свидетельствует о снижении рекреационной нагрузки. Данный факт объясняется закрытием пионерлагерей, организацией обустроенных мест отдыха горожан и выделением отдельных участков для свалки бытового и строительного мусора, вследствие чего рекреационная нагрузка стала меньше. Степень рекреационной дигрессии за исследуемый период изменилась с IV на III.

С начала 2000-х гг. на АО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод» (основное металлургическое предприятие г. Красноярск) начался переход на новую технологию («Экологический Содерберг»), позволившую снизить

количество вредных для окружающей среды выбросов [4]. Результаты анализа смешанного образца растений напочвенного покрова в 2017 г. (табл. 4) и их сравнение с литературными данными показали, что на момент исследований концентрации токсичных элементов в растениях не достигают избыточных значений, при которых происходит нарушение стабильности их развития [13].

Таблица 4

Содержание элементов в растительном материале (мг/кг сухой массы)

Элемент	Определенное в ходе исследования				По литературным данным [7]	
	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 4	Достаточное	Избыточное
Zn	9,6±1,9	12,8±2,6	24,5±4,9	21,2±4,2	27...150	100...400
Pb	<0,10	<0,10	<0,10	0,87±0,22	5...10	30...300
Cd	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05...0,20	5...30
F	17,3±1,7	11,4±1,1	22,8±2,3	29,5±2,9	5...30	50...500

Это позволяет предположить, что изменения в растительном покрове, отмеченные в 2017 г., в большей мере обусловлены рекреационной, нежели техногенной нагрузкой.

Заключение

Установлено, что изменения в напочвенном покрове, отмеченные в 2017 г. по отношению к состоянию напочвенного покрова в 2005 г., в большей мере обусловлены рекреационной, нежели техногенной, нагрузкой (изменившейся в связи с внедрением на АО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод» новой технологии, позволившей снизить количество токсичных промышленных выбросов).

Анализ изменений видового разнообразия, количественного соотношения эколого-ценотических групп, структуры и абсолютного значения запаса фитомассы показал, что на ПП 1 вследствие возросшей рекреационной нагрузки изменилась стадия рекреационной дигрессии напочвенного покрова со II на III. В результате снижения рекреационного и техногенного воздействия на ПП 4 стадия дигрессии изменилась с IV на III, тогда как на ПП 2 и 3 сохранились отмеченные в 2005 г. стадии дигрессии напочвенного покрова (II и III соответственно).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антипова Е.М. Сорная растительность северных лесостепей Средней Сибири // Вестн. КрасГАУ. 2008. № 2. С. 80–84. [Antipova E.M. Weed Vegetation of the Northern Forest Steppes of Central Siberia. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2008, no. 2, pp. 80–84].
2. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. [Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.].
3. Буторина Т.Н. Эколого-ценотический анализ кустарничково-травяного яруса лесных ассоциаций // Типы лесов Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 31–52. [Butorina T.N. Ecological and Cenotic Analysis of the Shrub-Grass Layer of Forest Communities. *Forest Types of Siberia*. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, pp. 31–52].
4. Внедрение проекта «Экологически приемлемая технология Содерберга» АО «РУСАЛ Красноярск». Режим доступа: <http://tehne.com/assets/i/upload/event/RUSAL-Krasnoarsk.pdf> (дата обращения: 02.04.19). [Implementation of the Project "Environmentally friendly technology Soderberg" AO "RUSAL Krasnoyarsk".

tally Sound Technology of Soderberg” JSC “RUSAL Krasnoyarsk”. Moscow, RUSAL, 2017. 11 p.].

5. Горчаковский П.Л. Антропогенные изменения растительности: мониторинг, оценка, прогнозирование // Экология. 1984. № 5. С. 3–16. [Gorchakovskiy P.L. Anthropogenic Changes in Vegetation: Monitoring, Estimation, Prognostication. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 1984, no. 5, pp. 3–16].

6. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2016 году». Красноярск: М-во природ. ресурсов и экологии Красноярского края, 2017. 301 с. [State Report on the State and Protection of the Environment in the Krasnoyarsk Krai in 2016. Krasnoyarsk, Ministry of Natural Resources and Environment, 2017. 301 p.].

7. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с. [Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p.].

8. Красная книга Красноярского края: Растения и грибы. Красноярск: Поликом, 2005. 368 с. [Red Book of the Krasnoyarsk Krai: Plants and Mushrooms. Krasnoyarsk, Polikom Publ., 2005. 368 p.].

9. Назимова Д.И., Дробушевская О.В., Данилина Д.М., Коновалова М.Е., Кофман Г.Б., Бугаева К.С. Биоразнообразие и динамика низкогорных лесов Саян: региональный и локальный уровни // Разнообразие и динамика лесных экосистем России: в 2 кн. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2012. Кн. 1. С. 131–172. [Nazimova D.I., Drobushhevskaya O.V., Danilina D.M., Konovalova M.E., Kofman G.B., Bugayeva K.S. Biodiversity and Dynamics of Low-Mountain Sayan Forests: Regional and Local Levels. *Diversity and Dynamics of Forest Ecosystems in Russia*. In 2 books. Moscow, KMK Publ., 2012, book 1, pp. 131–172].

10. Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1974. 403 с. [Program and Method of Biogeocenological Studies. Moscow, Nauka Publ., 1974. 403 p.].

11. Прокопьев Е.П., Рыбина Т.А. Опыт мониторинга синантропизации и антропогенной трансформации растительного покрова особо охраняемых природных территорий г. Томска // Вестн. Томск. гос. ун-та. Сер.: Биология. 2010. № 3(11). С. 109–118. [Prokopiev E.P., Rybina T.A. Experience of Monitoring Synanthropization and Anthropogenic Transformation of Vegetation of Specially Protected Areas in Tomsk. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2010, no. 3(11), pp. 109–118].

12. Рысин Л.П., Рысин С.Л. Урболесоведение. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2012. 240 с. [Rysin L.P., Rysin S.L. *Urban Forest Science*. Moscow, KMK Publ., 2012. 240 p.].

13. Скрипальщикова Л.Н., Пономарева Т.В., Бажина Е.В., Барченков А.П., Белянин А.В. Техногенные нагрузки на березняки Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 130–135. [Skrupal'shchikova L.N., Ponomareva T.V., Bazhina E.V., Barchenkov A.P., Belyanin A.V. Technogenic Loads on Birch Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2017, no. 6, pp. 130–135]. DOI: [10.15372/SJFS20170611](https://doi.org/10.15372/SJFS20170611)

14. Таран И.В. Рекреационные леса Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1985. 230 с. [Taran I.V. *Recreational Forests of Western Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 230 p.].

15. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 366 с. [Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bergman I.E. *Biological Productivity of Ural Forests under Conditions of Air Pollutions: An Investigation of a System of Regularities*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2012. 366 p.].

16. Brown J.H., Kallsz S.P., Wright W.R. Effects of Recreational Use on Forested Sites. *Environmental Management*, 1977, vol. 1, iss. 5, pp. 425–431. DOI: [10.1007/BF01866999](https://doi.org/10.1007/BF01866999)
17. Chandrashekara U.M., Muraleedharan P.K., Sibichan V. Anthropogenic Pressure on Structure and Composition of a Shola Forest in Kerala, India. *Journal of Mountain Science*, 2006, vol. 3, iss. 1, pp. 58–70. DOI: [10.1007/s11629-006-0058-0](https://doi.org/10.1007/s11629-006-0058-0)
18. Chernen'kova T.V. Biodiversity of Forest Vegetation under Industrial Pollution. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, iss. 1, pp. 1–10. DOI: [10.1134/S1067413614010044](https://doi.org/10.1134/S1067413614010044)
19. Dulamsuren C., Hauck M., Mühlenberg M. Vegetation at the Taiga Forest-Steppe Borderline in the Western Khentey Mountains, Northern Mongolia. *Annales Botanici Fennici*, 2005, vol. 42, no. 6, pp. 411–426.
20. Hytönen J., Issakainen J. Effect of Repeated Harvesting on Biomass Production and Sprouting of *Betula pubescens*. *Biomass and Bioenergy*, 2001, vol. 20, iss. 4, pp. 237–245. DOI: [10.1016/S0961-9534\(00\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00083-0)
21. Osumi K. Reciprocal Distribution of Two Congeneric Trees, *Betula platyphylla* var. *japonica* and *Betula maximowicziana*, in a Landscape Dominated by Anthropogenic Disturbances in Northeastern Japan. *Journal of Biogeography*, 2005, vol. 32, iss. 12, pp. 2057–2068. DOI: [10.1111/j.1365-2699.2005.01368.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01368.x)
22. Otoda T., Sakamoto K., Hirobe M., Undarmaa J., Yoshikawa K. Influences of Anthropogenic Disturbances on the Dynamics of White Birch (*Betula platyphylla*) Forests at the Southern Boundary of the Mongolian Forest-Steppe. *Journal of Forest Research*, 2013, vol. 18, iss. 1, pp. 82–92. DOI: [10.1007/s10310-011-0324-z](https://doi.org/10.1007/s10310-011-0324-z)
23. Vorobeichik E.L., Kozlov M.V. Impact of Point Polluters on Terrestrial Ecosystems: Methodology of Research, Experimental Design, and Typical Errors. *Russian Journal of Ecology*, 2012, vol. 43, iss. 2, pp. 89–96. DOI: [10.1134/S1067413612020166](https://doi.org/10.1134/S1067413612020166)
23. Zvereva E.L., Toivonen E., Kozlov M.V. Changes in Species Richness of Vascular Plants under the Impact of Air Pollution: A Global Perspective. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, vol. 17, iss. 3, pp. 305–319. DOI: [10.1111/j.1466-8238.2007.00366.x](https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00366.x)

UNDERSTORY VEGETATION COVER COMPONENTS ASSESSMENT IN ANTHROPOGENICALLY DISTURBED BIRCH STANDS OF KRASNOYARSK FOREST-STEPPE

I.A. Goncharova^{1, 2}, Candidate of Biology, Research Scientist;

ResearcherID: [AAF-6890-2019](https://orcid.org/0000-0002-3495-9979), ORCID: [0000-0002-3495-9979](https://orcid.org/0000-0002-3495-9979)

L.N. Skripal'shchikova¹, Candidate of Biology, Assoc. Prof., Senior Research Scientist;

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

A.P. Barchenkov¹, Candidate of Biology, Research Scientist; ORCID: [0000-0003-3964-480X](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X)

A.S. Shushpanov^{1, 3}, Candidate of Biology, Research Scientist; ResearcherID: [P-9468-2016](https://orcid.org/0000-0003-3833-5730), ORCID: [0000-0003-3833-5730](https://orcid.org/0000-0003-3833-5730)

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: iagoncharova007@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, alexbarchenkov@mail.ru, shushpanov.as@ksc.krasn.ru

²Krasnoyarsk Museum of Regional Studies, Krasnoyarsk, ul. Dubrovinskogo, 84, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: iagoncharova007@mail.ru

³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety «Krasnoyarskiy rabochiy», 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; e-mail: shushpanov.as@ksc.krasn.ru

The vegetation cover characteristics of anthropogenically disturbed birch stands of Krasnoyarsk forest-steppe are studied. The research purpose is to study the current state of under-

story vegetation cover of the birch stands, which have been exposed to recreational and anthropogenic impacts for a long time, as well as to assess the degree and nature of its change over the 12-year period since the last research. The studies were carried out on the sample plots laid out in mixed herbs birch stands. Cenoses are characterized by V–VI age classes, II–IV quality classes, and 0.6–0.9 density of stocking. The birch stands are located in the main transfer of Krasnoyarsk industrial emissions. Phytocenoses were under significant anthropogenic and recreational impact for a long time. At each facility, 30 sites (1 m² each) were laid, where species composition, horizontal and vertical structure, projective cover and occurrence of undergrowth and forest live cover species were assessed. The comparative analysis of floristic lists was performed using the Sørensen-Czekanowski coefficient (K_{sc}). The degree of species diversity was estimated by using the Shannon index; the degree of recreational transformation – synanthropization index. Cuttings were taken from 10 sites (20 × 25 cm each) for recording the phytomass stock of forest live cover on each sample area. Plants were cut off at the litter level, sorted by species, dried and weighed. Rating scales of digression were used to study the recreation influence. The degree of anthropogenic impact was determined by the content of toxic ingredients in plants of living ground cover. It is found that the toxic elements concentration in plants does not reach excessive values at which homeostasis disturbance happens. It was concluded that the changes in vegetation cover observed in 2017 in relation to the state of 2005 are more due to recreational than anthropogenic impact; which changed due to the introduction of a new technology at the JSC “RUSAL Krasnoyarsk Aluminum Plant”, which made it possible to reduce toxic industrial emissions. According to the study results, the species composition of the undergrowth and forest live cover was determined, the features of its change over a 12-year period were revealed. It is noted that species diversity has decreased and the proportion of synanthropic species has increased across all plots. Total forest live cover phytomass and individual species phytomass are determined at each plot. The regularities of change in different species contribution to the total stock of phytomass, depending on recreational impact changes, were identified. The ground cover recreational digression stages are determined by analyzing the changes in species diversity, the quantitative ratio of ecological-cenotic groups, the structure and the absolute value of phytomass.

For citation: Goncharova I.A., Skripal'shchikova L.N., Barchenkov A.P., Shushpanov A.S. Understory Vegetation Cover Components Assessment in Anthropogenically Disturbed Birch Stands of Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 75–87. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-75-87

Funding: The study was carried out within the framework of the basic research projects of the Sukachev Institute of Forest SB RAS “Biodiversity of Indigenous Coniferous and Derivative Forest Ecosystems” (No. 0356-2016-0301) and “Dynamics of Siberian Forests in a Changing Climate. Monitoring of the Living State, Productivity and Ranges of the Main Forest-Forming Species of Woody Plants” (No. 0356-2018-0739).

Keywords: Krasnoyarsk forest-steppe, birch stands, ground layer, species composition, anthropogenic factors, phytomass stock.

Поступила 02.04.19 / Received on April 2, 2019

УДК 631.95

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-88-98

ИЗМЕНЕНИЕ ГУСТОТЫ И ВИДОВОГО СОСТАВА ПОДРОСТА ПРИ РАЗНОМ УДАЛЕНИИ ОТ «СТЕН» ЛЕСА НА ПОСТАГРОГЕННЫХ ПЛОЩАДЯХ*П.А. Феклистов², д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: [0000-0001-8226-893X](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X)**М.В. Аверина¹, аспирант**И.Н. Болотов², д-р биол. наук, директор; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/P-2892-2015),**ORCID: [0000-0002-3878-4192](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192)**Б.Ю. Филиппов¹, д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: [O-7389-2017](https://orcid.org/O-7389-2017),**ORCID: [0000-0002-6965-7137](https://orcid.org/0000-0002-6965-7137)**Д.Н. Клевцов¹, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: [000-0001-6902-157X](https://orcid.org/000-0001-6902-157X)*¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;e-mail: averina.mariya1990@yandex.ru²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: dirnauka@fciactic.ru

Работа посвящена изучению изменения густоты и видового разнообразия подроста при разном расстоянии от «стен» леса на постагроденных землях, а также факторам, влияющим на его распределение по площади. Исследования проведены в средней подзоне тайги в Вельском районе Архангельской области. Подрост изучался на учетных лентах, заложенных параллельно стенам леса и на разном расстоянии от них с интервалом 10 м. Перечеты проводились по породам, категориям высоты и жизненного состояния. Для всех постагроденных площадей определялся тип пользования, срок неиспользования по назначению, степень задернения и гранулометрический состав почвы. Основными факторами, влияющими на процесс зарастания и дальность распространения подроста, являются срок неиспользования данной площади по назначению (коэффициент корреляции – 0,94) и степень задернения почвы (коэффициент корреляции – 0,54). Чем больше времени прошло с момента прекращения сельскохозяйственной деятельности, тем выше количество подроста и тем он дальше распространяется от стен леса. В случае, если продолжительность неиспользования земли составляет 10 лет, подрост встречается до расстояния 50 м от стены леса, а при продолжительности 20–25 лет он появляется и на расстоянии 90 м. На дальность распространения подроста не влияют такие характеристики поля, как тип пользования, гранулометрический состав почвы. При удалении от стены леса общая густота подроста снижается от 10 000 (0...30 м) до 1 600 шт./га (80...90 м). Для хозяйственно ценных пород, ели и сосны, эти цифры составляют соответственно от 7 533 (10 м от стены леса) до 800 шт./га (90 м от стены леса) и от 2 533 (10 м) до 400 шт./га (90 м от стены леса). Видовой спектр подроста соответствует составу древесной растительности в стенах леса, примыкающих к полям, и включает сосну, ель, березу, ольху, осину. При удалении от стены леса на 30 м осина из породного состава исчезает. Соотношение пород в составе подроста колеблется, но доминирующими породами остаются ель и сосна на разных расстояниях от стен леса.

Для цитирования: Феклистов П.А., Аверина М.В., Болотов И.Н., Филиппов Б.Ю., Клевцов Д.Н. Изменение густоты и видового состава подроста при разном удалении от «стен» леса на постагроденных площадях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 88–98. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-88-98

Финансирование: Исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова РАН (проект № 0409-2019-0039; № ГР АААА-А18-118011690221-0).

Ключевые слова: подрост, древесные породы, густота подроста, высота подроста, постагроденные земли.

Введение

За последние 15–20 лет в структуре землепользования России произошли существенные изменения. Значительные территории бывших полей (пашни, сенокосы, выгоны) в связи с закрытием колхозов и совхозов не используются по назначению. Материалы проведенных ранее исследований [4, 6, 7, 9, 11, 15, 17, 21, 22, 24–34] свидетельствуют о том, что после прекращения использования по целевому назначению сельскохозяйственные угодья зарастают травяно-кустарничковой и древесно-кустарниковой растительностью. Основная часть этих работ посвящена изучению факторов, влияющих на состав, густоту формирующихся молодняков, или состоянию уже спелых лесов на данной территории. Лишь несколько работ [5, 10, 18] содержат информацию о том, как изменяется количество и видовой состав подроста при удалении от «стены» леса. Однако эти работы проводились в других регионах, условия которых отличны от Архангельской области.

Цель исследования – изучение густоты и видового разнообразия подроста на разном удалении от стен леса на постагrogenных площадях в средней подзоне тайги, а также факторов, влияющих на этот процесс.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на бывших сельскохозяйственных участках в окрестностях дер. Березово Вельского района Архангельской области. Территория относится к средней подзоне тайги [12]. Участки делились на различные группы: пашни, сенокосы, выгоны-пастбища (в дальнейшем будем условно называть их полями) [14]. Все они примыкали к стене леса. Было изучено 10 полей и получены следующие характеристики: тип пользования, срок неиспользования по сельскохозяйственному назначению, гранулометрический состав почвы (по методике [2]) и степень задернения (по [16]). На каждом поле от кромки леса перпендикулярно его стене закладывались трансекты до того расстояния, где встречалась древесная растительность, через каждые 10 м трансекты – учетные ленты размером 25×2 м, параллельные стене леса. На каждой учетной ленте проводился сплошной пересчет всего подроста с учетом методических рекомендаций [13, 16, 23]. В результате были получены данные по видовому составу, густоте и высоте подроста.

На каждом лесном участке, примыкающем к полям в районе трансект, выполнялась таксация в соответствии с методическими рекомендациями Н.П. Анучина [3] и И.И. Гусева [8].

При обработке материалов использовались методы вариационной статистики [20] и корреляционный анализ между качественными и количественными признаками.

Таким образом было обследовано 10 полей и заложено на них 55 учетных лент. Среди сельхозугодий были пашни, сенокосы и выгоны-пастбища, гранулометрический состав почвы которых изменялся от супесчаной до среднесуглинистой с разной степенью задернения (табл. 1). Срок неиспользования сельхозугодий по назначению, взятый из архивных данных, составлял от 10 до 25 лет.

Таблица 1

Количество учетных лент на поле и его характеристики

Номер поля	Количество учетных лент	Тип пользования	Гранулометрический состав почвы	Степень задержания	Срок неиспользования, лет
1	9	Пашня	Среднесуглинистая	Средняя	20
2	3	Сенокос	Суглинистая	Слабая	10
3	3	Сенокос	Среднесуглинистая	Слабая	12
4	9	Сенокос	Среднесуглинистая	Средняя	25
5	4	Сенокос	Супесчаная	Слабая	13
6	4	Сенокос	Супесчаная	Слабая	15
7	3	Выгон	Среднесуглинистая	Средняя	13
8	9	Сенокос	Среднесуглинистая	Средняя	21
9	6	Сенокос	Суглинистая	Сильная	18
10	5	Пашня	Среднесуглинистая	Средняя	15

Результаты исследования и их обсуждение

Изучение протекания вторичной сукцессии на землях из-под сельскохозяйственного пользования важно, во-первых, для того, чтобы установить, сколько потребуется времени для появления подроста, во-вторых – каков видовой состав подроста, его количество и изменение во времени, т. е. ценность и продуктивность вновь образующихся лесов.

Очевидно, что чем больше времени прошло с момента прекращения сельскохозяйственной деятельности, тем выше вероятность заселения такого поля древесными растениями, но нет ясности о скорости этого процесса. Проведенные нами исследования показали, что, например, после 10 лет неиспользования земли подрост встречается до расстояния 30 м, после 20–25 лет – он появляется и на расстоянии 90 м от стены леса (рис. 1).

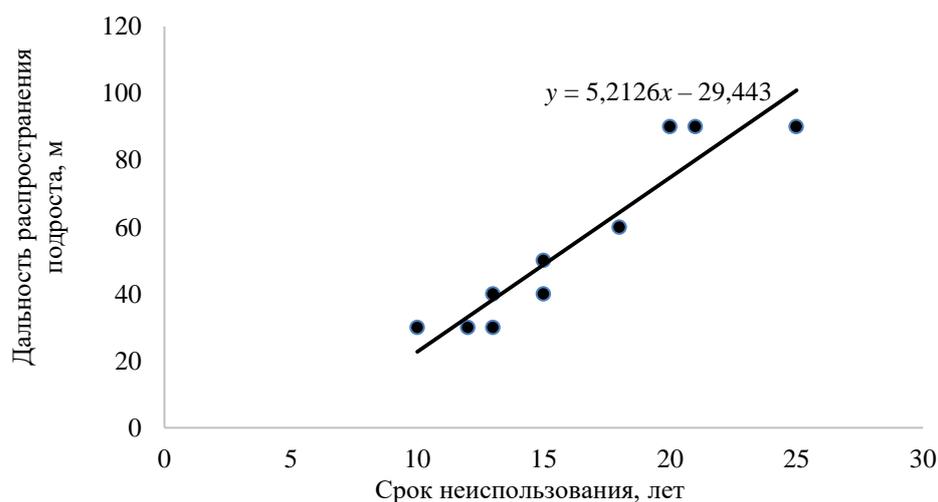


Рис. 1. Зависимость дальности распространения подроста от срока неиспользования сельхозугодий

Fig. 1. Dependence of the undergrowth dispersal distance on the duration of non-use of agricultural lands

Имеющиеся данные позволили определить скорость зарастания полей – отношение дальности распространения подроста на трансекте к сроку неиспользования угодья, которое в среднем составляло 3,3 м в год. Очевидно, что это некая абстрактная величина и для каждой породы она будет своя в зависимости от биологических особенностей видов, условий распространения семян, их приживаемости и т. п., но тем не менее она дает представление о скорости сукцессии.

Корреляционный анализ показал, что тип сельскохозяйственного пользования и гранулометрический состав почвы не влияют на дальность распространения подроста на полях. Коэффициенты корреляции низки и недостоверны (табл. 2).

Таблица 2

Корреляционный анализ зависимости дальности распространения подроста от характеристик участка

Характеристика участка	Показатель связи		
	r	m_r	t_r
Тип пользования	0,41	$\pm 0,261$	1,6
Гранулометрический состав	$< 0,01$	$\pm 0,316$	$< 0,01$
Степень задернения	0,54	$\pm 0,024$	2,4
Срок неиспользования	0,94	$\pm 0,036$	26,5

Примечание: Здесь и далее, в табл. 3 и 4, r – коэффициент корреляции; m_r – ошибка коэффициента корреляции; t_r – достоверность коэффициента корреляции; пороговое значение $t_r = 2,01$ при $p = 0,95$.

Хотя на первый взгляд поля из-под пашни должны бы заселяться быстрее, семена попадают на минерализованную почву. Вероятно, что-то мешает их прорастанию и укоренению проростков. Очень тесная связь дальности распространения подроста наблюдается со сроком неиспользования постагрозенных земель (коэффициент корреляции 0,94), значительная – со степенью задернения (коэффициент корреляции 0,54). Приведенные результаты отчасти согласуются с ранее полученными по Кенозерскому национальному парку [1].

При анализе динамики видового разнообразия и густоты подроста в процессе удаления от стены леса рассмотрено 2 группы полей: первая – 3 поля с давностью неиспользования по назначению 0–25 лет и дальностью распространения подроста до 90 м от стены леса; вторая – 3 поля с давностью неиспользования 10–15 лет и дальностью распространения подроста 50 м.

На полях *первой группы* на любом расстоянии от стены леса весь подрост можно расположить по породам и количеству в следующей последовательности: ведущую роль занимает ель, далее следуют сосна, береза и ольха серая, осина в незначительном количестве отмечалась только на расстоянии 10 и 30 м (табл. 3, рис. 2).

Таблица 3

Корреляционный анализ зависимости густоты подроста от расстояния до стены леса на полях с давностью неиспользования 20–25 лет

Порода	Показатель связи		
	r	m_r	t_r
Ель	-0,94	0,037	25,4
Сосна	-0,81	0,116	6,9
Береза	-0,85	0,095	8,9
Ольха	-0,60	0,212	2,9

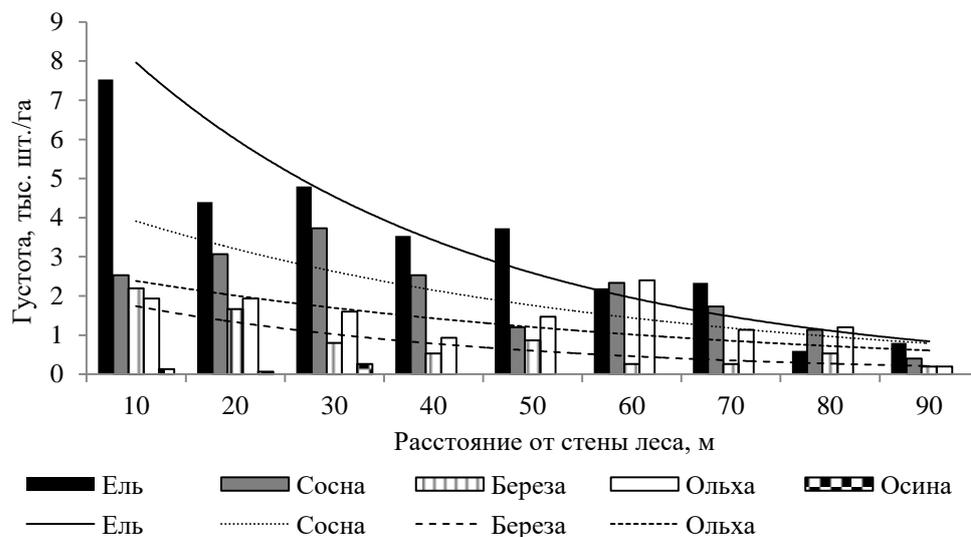


Рис. 2. Изменение густоты подроста при удалении от стены леса на полях с давностью неиспользования по назначению 20–25 лет (ель: $y = 10,542e^{-0,281x}$; сосна: $y = 4,7775e^{-0,2x}$; ольха: $y = 2,8305e^{-0,171x}$; береза: $y = 2,2625e^{-0,265x}$)

Fig. 2. Change in density of undergrowth when moving away from a forest edge in fields with 20–25 years of non-use as intended (spruce: $y = 10.542e^{-0.281x}$; pine: $y = 4.7775e^{-0.2x}$; alder: $y = 2.8305e^{-0.171x}$; birch: $y = 2.2625e^{-0.265x}$)

Отчетливо просматривается тренд снижения густоты подроста по мере удаления от стены леса для всех пород, кроме осины. В отношении последней трудно сделать какое-либо заключение из-за ее малого количества. Ель снижает густоту от 7 533 до 800 шт./га, сосна – от 2 533 до 400 шт./га, береза – от 2 200 до 200 шт./га, ольха – от 1 933 до 200 шт./га. Соответственно уменьшается и общая густота всех пород по мере удаления от стены леса. Следует заметить, что вблизи стены на расстоянии примерно до 30 м общая густота всех пород доходит до 10 000 шт./га., а на расстоянии 90 м – до 1 600 шт./га, т. е. фактически произошло полное заселение бывших сельхозугодий древесными породами. Количество хвойного подроста довольно высоко и можно предполагать, что в последующем будет сформирован древостой с преобладанием ели и сосны.

При удалении от стены леса изменяется и видовой состав подроста (рис. 2). Соотношение пород в составе подроста на разном удалении от стены леса колеблется. На большей части учетных лент доминирующей породой является ель (за исключением учетных лент, удаленных на 60 м от стены леса, где 3 породы (ель, сосна, ольха) имеют равные доли участия (по 3 ед.), и на 80 м, где доминирует сосна). Коэффициент участия ели в составе колеблется от 2 до 5 ед. Доля участия сосны на разном расстоянии от стены леса составляет 2-3 ед., березы – 1-2 ед., ольхи – 1–3 ед. На расстоянии до 30 м от стены леса в породном составе присутствует осина, ее доля незначительна (ее участие в формуле соответствует лишь показателю +), а при удалении более чем на 30 м она исчезает из породного состава полностью.

Источниками обсеменения заброшенных сельскохозяйственных угодий являлись стены леса, примыкающие к трансектам. Древостои имели состав 5Е4Ос1Олс, 5С3Олс1С1Б, 6ЕЗБ1Олс+Ос. Отсюда и обсеменение представленными видами и соответствующий этому подрост.

На полях *второй группы* с давностью неиспользования 10–15 лет и дальностью распространения подроста 30 м встречается тот же набор видов подроста, но состав отличается заметно. На 10 м от стены леса средняя формула составляет 5Ол3С1Е1Б, на 20 м – 4Ол3С2Е1Б, на 30 м – 4С3Б2Ол1Е. Большую долю в составе занимает ольха серая. На первый взгляд это кажется странным. Классическими породами-пионерами всегда считались береза, сосна, осина (например, [19]).

Однако можно предположить, что появление ольхи с ее клубеньковыми бактериями на корнях, способными накапливать азот, создает благоприятную среду для последующего естественного возобновления ели. Ведь в первом случае, когда срок неиспользования угодий был 20–25 лет, именно ель явилась доминирующей породой.

Источник обсеменения – стены леса, примыкающие к трансектам, древостои которых имели состав 8С1Б1Олс+Е, 6Б2Е2С+Олс, 5Е4Б1Олс, 3Е2С5Б, 4С4Ос1Олс1Е, 4Е3С2Б1Олс. Отсюда и обсеменение представленными видами и соответствующий этому подрост.

Здесь также отмечается резкое снижение густоты подроста при удалении от стены леса. Такой тренд имеют ольха, сосна, ель, но береза более или менее стабильна на разном расстоянии. Густота подроста здесь ниже, чем в предыдущем случае с большей давностью неиспользования полей. Общее количество подроста снижается от 9 000 шт./га на расстоянии 10 м до 800 шт./га на расстоянии 50 м (рис. 3, табл. 4).

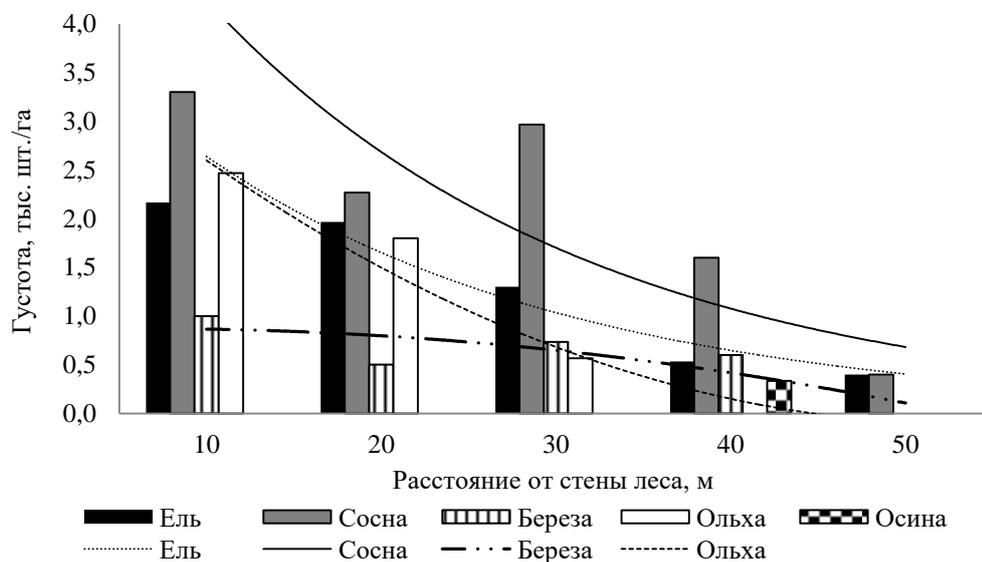


Рис. 3. Изменение густоты подроста при удалении от стены леса на полях с давностью неиспользования по назначению 10–15 лет (ель: $y = 4,2147e^{-0,468x}$; сосна: $y = 6,6946e^{-0,457x}$; ольха: $y = 0,1429x^2 - 1,5305x + 3,9867$; береза: $y = -0,0405x^2 + 0,0529x + 0,8533$)

Fig. 3. Change in density of undergrowth when moving away from a forest edge in fields with 10–15 years of non-use as intended (spruce: $y = 4.2147e^{-0.468x}$; pine: $y = 6.6946e^{-0.457x}$; alder: $y = 0.1429x^2 - 1.5305x + 3.9867$; birch: $y = -0.0405x^2 + 0.0529x + 0.8533$)

Таблица 4

Корреляционный анализ зависимости густоты подроста от расстояния до стены леса на полях с давностью неиспользования 10–15 лет

Порода	Показатель связи		
	r	m _r	t _r
Ель	-0,97	0,023	40,7
Сосна	-0,88	0,099	8,9
Береза	-0,60	0,321	1,9
Ольха	-0,99	0,013	75,8

Анализ подроста разных высотных групп показал, что для разных пород характерна одна особенность: преобладает крупный (более 1,5 м) подрост. Участие крупного подроста в составе возобновления наибольшее у лиственных древесных пород (у березы и ольхи соответственно 68 и 65 %), чуть меньше у сосны (61 %) и примерно половина у ели (52 %) (рис. 4). Большое количество крупного подроста на постагrogenных землях свидетельствует о его интенсивном росте, значительно превышающем значения для среднетаежного подрайона [13].

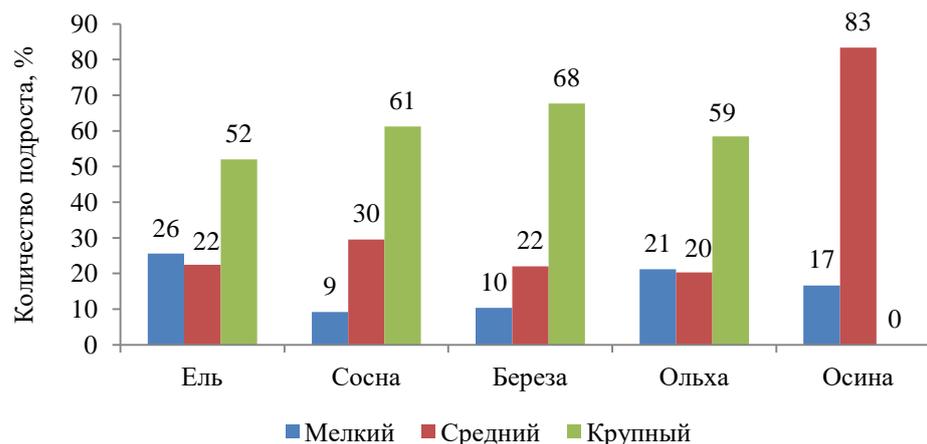


Рис. 4. Участие подроста по породам и категориям высоты

Fig. 4. Undergrowth participation by breeds and height classes

Бывшие сельхозугодья оказались весьма благоприятны для естественного возобновления лесообразующих пород и по темпам роста их подроста.

В отношении размещения подроста разного размера по площади сельхозугодий никаких закономерностей не выявлено для всех пород, за исключением ели. Для нее имеет место отчетливый тренд уменьшения количества мелкого (до 0,5 м) подроста по мере удаления от стены леса и увеличения количества крупного. Эта закономерность кажется странной, семена приносятся ветром от стены леса, и чем ближе к ней, тем больше семян. Однако возникает вопрос, почему на большом удалении от стены леса преобладает крупный подрост ели. Но, как известно, ель имеет поверхностную корневую систему, и, следовательно, у стены леса подрост наверняка испытывает конкуренцию взрослых деревьев, что подавляет его рост. На этот факт обращал внимание еще Г.Ф. Морозов [19].

Выводы

1. Заращение сельхозугодий происходит со средней скоростью 3,3 м за год.
2. Основными факторами, влияющими на дальность распространения подроста, являются срок неиспользования поля по назначению (коэффициент корреляции – 0,94) и степень задернения почвы (0,54).
3. Общая густота подроста всех пород по мере удаления от стены леса уменьшается от 10 000 шт./га (при 10 м) до 1 600 шт./га (при 90 м); каждая отдельная порода также снижает свою густоту: ель – с 7 533 до 800 шт./га, сосна – с 2 533 до 400 шт./га.
4. Доминирующими породами на разном расстоянии от стен леса являются ель и сосна, однако доля ольхи и березы значительна.
5. Крупный подрост преобладает на разных расстояниях от стен леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аверина М.В., Феклистов П.А., Третьяков С.В., Кононов О.Д. Вторичные сукцессии на землях из-под сельскохозяйственного пользования на территории Кенозерского национального парка // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 5. С. 25–32. [Averina M.V., Feklistov P.A., Tretyakov S.V., Kononov O.D. Secondary Successions on the Lands from under Agricultural Use in the Kenozersky National Park Territory. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2016, no. 5, pp. 25–32].
2. Александрова Л.Н., Найденова О.А. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. Л.: Колос, 1976. 280 с. [Aleksandrova L.N., Naydenova O.A. *Laboratory and Practical Classes in Soil Science*. Leningrad, Kolos Publ., 1976. 280 p.].
3. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 512 с. [Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 512 p.].
4. Беляев В.В., Кононов О.Д., Карaban А.А., Старицын В.В. Состояние древесной растительности на землях, выбывших из хозяйственного оборота в Архангельской области // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2013. № 2. С. 5–11. [Belyaev V.V., Kononov O.D., Karaban A.A., Staritsyn V.V. Condition of Woody Plants on the Farmlands Excluded from the Economic Turnover in the Arkhangelsk Region. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki*, 2013, no. 2, pp. 5–11].
5. Вараксин Г.С., Вайс А.А., Байкалов Е.М. Заращение древесной растительностью земель сельскохозяйственного назначения // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 5. С. 201–205. [Varaksin G.S., Vais A.A., Baikalov E.M. Agricultural Land Colonization by Tree Vegetation. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2012, no. 5, pp. 201–205].
6. Войтюк М.М. Сельские леса, их особенности и продуктивность // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2005. № 5. С. 126–136. [Voityuk M.M. Rural Forests, Their Distinctive Features and Productivity. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2005, no. 5, pp. 126–136].
7. Гульбе А.Я. Процесс формирования молодняков древесных пород на залежи в южной тайге (на примере Ярославской области): автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2009. 23 с. [Gul'be A.Ya. *Forming of Tree Species Offspring on Grass Sward in the Southern Taiga (On the Example, Yaroslavl Region)*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 23 p.].
8. Гусев И.И. Таксация древостоя. Архангельск: АГТУ, 2000. 71 с. [Gusev I.I. *Inventory of the Forest Stand*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2000. 71 p.].
9. Дегтева С.В., Головнева Л.Б. Особенности сукцессионного ряда луг – сероольшанник // Тр. Коми фил. АН СССР. Сыктывкар, 1987. Вып. 82. Экологоценоотическое и флористическое изучение фитоценозов Европейского Севера. С. 67–76.

[Degteva S.V., Golovneva L.B. Features of the Meadow – Gray Alder Succession Series. *Trudy Komi filiala AN SSSR*, 1987, iss. 82, pp. 67–76].

10. Залесов С.В., Магасумова А.Г., Юровских Е.В. Заращение бывших сельскохозяйственных угодий в Слободо-Туринском районе Свердловской области // Леса России и хозяйство в них. 2009. № 4(34). С. 14–23. [Zalesov S.V., Magasumova A.G., Jurovskih E.V. Regeneration of Former Agricultural Lands Inslobodo-Turinsky District of Sverdlovsk Region. *Lesy Rossii i khozyaystvo v nikh*, 2009, no. 4(34), pp. 14–23].

11. Залесов С.В., Новоселова Н.Н., Абрамова Л.П. Формирование насаждений на землях, вышедших из-под сельскохозяйственного использования, в условиях средней подзоны тайги Пермской области // Леса Урала и хозяйство в них. 2004. № 25. С. 30–41. [Zalesov S.V. Formation of Stands on the Lands Taken out of Agricultural Use in the Middle Taiga Subzone of Perm Region. *Lesy Urala i khozyaystvo v nikh*, 2004, no. 25, pp. 30–41].

12. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с. [Kurnayev S.F. *Forest Vegetation Zoning of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 203 p.].

13. Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР (нормативные материалы для Архангельской, Вологодской областей и Коми АССР) / Сост.: Г.С. Войнов, Е.Г. Тюрин, И.И. Гусев. Архангельск: АИЛиЛХ, 1986. 358 с. [*Forest Inventory Guide for the North-East of the European Part of the USSR (Standards for Arkhangelsk and Vologda Regions, and the Komi ASSR)*. Content by G.S. Voynov, E.G. Tyurin, I.I. Gusev. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1986. 358 p.].

14. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 415 с. [Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavayeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dynamics of Agricultural Lands of Russia in the 20th Century and Post-Agrogenic Restoration of Vegetation and Soils*. Moscow, GEOS Publ., 2010. 415 p.].

15. Мелехов В.И., Антонов А.М., Лохов Д.В. Лесоводственный потенциал неиспользуемых сельскохозяйственных угодий // Вестн. Помор. ун-та. 2011. № 3. С. 62–66. [Melekhov V.I., Antonov A.M., Lokhov D.V. Forestry Potential of Unused Agricultural Lands. *Vestnik Pomorskogo universiteta*. 2011, no. 3, pp. 62–66].

16. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: МГУЛ, 1999. 398 с. [Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, MGUL Publ., 1999. 398 p.].

17. Минин Н.С., Серый И.С. Анатомическое строение и плотность древесины сосняков, формирующихся на землях, вышедших из-под сельскохозяйственного использования // Проблемы лесоведения и лесоводства: материалы Всерос. конф. «Четвертые Мелеховские науч. чтения, посвящ. 105-летию со дня рождения И.С. Мелехова» (Архангельск, 10–12 ноября 2010 г.) Архангельск, 2010. С. 77–80. [Minin N.S., Seryy I.S. The Anatomical Structure and Wood Density of Pine Forests Formed on the Lands Taken out of Agricultural Use. *Proceedings of the All-Russian Conference: The Fourth Melekhov's Scientific Readings Dedicated to the 105th Anniversary of I.S. Melekhov "Issues of Forest Science and Forestry"*, Arkhangelsk, November 10–12, 2010. Arkhangelsk, 2010, pp. 77–80].

18. Морозов А.М., Николаева И.О. Особенности лесообразовательного процесса на пашне и сенокосе // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2013 № 5(103). С. 82–86. [Morozov A.M., Nikolayeva I.O. Features of Forest Regeneration on Arable Lands and Hayfields. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2013, no. 5(103), pp. 82–86].

19. Морозов Г.Ф. Учение о лесе. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 456 с. [Morozov G.F. *The Doctrine of Forest*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1949. 456 p.].

20. Никитин К.Е., Швиденко А.З. Методы и техника обработки лесоводственной информации. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 273 с. [Nikitin K.E., Shvidenko A.Z. *Methods and Techniques of Processing Forest Management Information*. Moscow, Leshn. prom-st', 1978. 273 p.].

ods and Technique of Forestry Information Processing. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 273 p.]

21. Новоселова Н.Н. Формирование лесных насаждений на землях, вышедших из-под сельскохозяйственного использования, в таежной зоне Пермского края: дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2007. 125 с. [Novoselova N.N. *The Formation of Forest Stands on the Lands Taken out of Agricultural Use in the Taiga Zone of the Perm Krai*: Cand. Agric. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2007. 125 p.]

22. Соколов Н.Н. Рост и продуктивность сосновых древостоев по старым пашням // Изв. вузов. Лесн. журн. 1978. № 4. С. 22–25. [Sokolov N.N. Growth and Productivity of Pine Stands on Old Arable Lands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1978, no. 4, pp. 22–25].

23. Феклистов П.А., Дрожжин Д.П., Гласова Н.В. Практикум по экологии. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 61 с. [Feklistov P.A., Drozhzhin D.P., Glasova N.V. *Workshop on Ecology*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 61 p.]

24. Шиманюк А.П. Заселение сосной и елью бывших пахотных угодий // Лесн. хоз-во. 1950. № 9. С. 50–52. [Shimanyuk A.P. Colonization of Former Arable Land by Pine and Spruce. *Lesnoye khozyaystvo*, 1950, no. 9, pp. 50–52].

25. Baeten L., Velghe D., Vanhellemont M., De Frenne P., Hermy M., Verheyen K. Early Trajectories of Spontaneous Vegetation Recovery after Intensive Agricultural Land Use. *Restoration Ecology*, 2010, vol. 18, iss. s2, pp. 379–386. DOI: [10.1111/j.1526-100X.2009.00627.x](https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00627.x)

26. Bellemare J., Motzkin G., Foster D.R. Legacies of the Agricultural Past in the Forested Present: An Assessment of Historical Land-Use Effects on Rich Mesic Forests. *Journal of Biogeography*, 2002, vol. 29, iss. 10-11, pp. 1401–1420. DOI: [10.1046/j.1365-2699.2002.00762.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00762.x)

27. Connell J.H., Slatyer R.O. Mechanisms of Succession in Natural Communities and Their Role in Community Stability and Organization. *The American Naturalist*, 1977, vol. 111, no. 982, pp. 1119–1144.

28. Flinn K.M., Vellend M. Recovery of Forest Plant Communities in Post-Agricultural Landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, vol. 3, iss. 5, pp. 243–250. DOI: [10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0243:ROFPCI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0243:ROFPCI]2.0.CO;2)

29. Fridley J.D., Wright J.P. Drivers of Secondary Succession Rates across Temperate Latitudes of the Eastern USA: Climate, Soils, and Species Pools. *Oecologia*, 2012, vol. 168, pp. 1069–1077. DOI: [10.1007/s00442-011-2152-4](https://doi.org/10.1007/s00442-011-2152-4)

30. Hedlund K., Santa Regina I., Van der Putten W.H., Lepš J., Díaz T., Korthals G.W. et al. Plant Species Diversity, Plant Biomass and Responses of the Soil Community on Abandoned Land across Europe: Idiosyncrasy or Above-Belowground Time Lags. *Oikos*, 2003, vol. 103, iss. 1, pp. 45–58. DOI: [10.1034/j.1600-0706.2003.12511.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12511.x)

31. Meiners S.J., Pickett S.T.A., Handel S.N. Probability of Tree Seedling Establishment Changes across a Forest-Old Field Edge Gradient. *American Journal of Botany*, 2002, vol. 89, iss. 3, pp. 466–471. DOI: [10.3732/ajb.89.3.466](https://doi.org/10.3732/ajb.89.3.466)

32. Stanturf J.A., Schweitzer C.J., Gardiner E.S. Afforestation of Marginal Agricultural Land in the Lower Mississippi River Alluvial Valley, U.S.A. *Silva Fennica*, 1998, vol. 32, no. 3, pp. 281–297. DOI: [10.14214/sf.688](https://doi.org/10.14214/sf.688)

33. Štolcová J. Secondary Succession on an Early Abandoned Field: Vegetation Composition and Production of Biomass. *Plant Protection Science*, 2002, vol. 38, no. 4, pp. 149–154. DOI: [10.17221/4871-PPS](https://doi.org/10.17221/4871-PPS)

34. Van der Putten W.H., Mortimer S.R., Hedlund K., Van Dijk C., Brown V.K., Lepä J. et al. Plant Species Diversity as a Driver of Early Succession in Abandoned Fields: A Multi-Site Approach. *Oecologia*, 2000, vol. 124, no. 1, pp. 91–99. DOI: [10.1007/s004420050028](https://doi.org/10.1007/s004420050028)

**CHANGES IN DENSITY AND SPECIES COMPOSITION OF UNDERGROWTH
AT DIFFERENT DISTANCES FROM THE FOREST EDGES
IN POSTAGROGENIC AREAS**

*P.A. Feklistov*², Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: [0000-0001-8226-893X](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X)

*M.V. Averina*¹, Postgraduate Student

*I.N. Bolotov*², Doctor of Biology; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/P-2892-2015), ORCID: [0000-0002-3878-4192](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192)

*B.Yu. Filippov*¹, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [O-7389-2017](https://orcid.org/O-7389-2017),

ORCID: [0000-0002-6965-7137](https://orcid.org/0000-0002-6965-7137)

*D.N. Klevtsov*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0001-6902-157X](https://orcid.org/0000-0001-6902-157X)

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: averina.mariya1990@yandex.ru

²Federal Center for Integrated Arctic Research of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation;

e-mail: dirnauka@fciarctic.ru

The work is devoted to the study of changes in density and species diversity of undergrowth at different distances from the forest edges on postagrogenic lands, as well as factors affecting the distribution of undergrowth by area. The studies were done in the middle subzone of taiga in the Velsk district of Arkhangelsk region. Undergrowth was studied on tapes laid out parallel to the forest edges and at different distances from them with 10-meter intervals. Enumerations were carried out by breed, height class and living state. The type of use, the period of non-use as intended, the degree of grassing down and the particle-size composition of soil were determined for all postagrogenic areas. The most important deriver affecting the process of overgrowth and range of propagation of undergrowth is the period of non-use of this area for the intended purpose (correlation coefficient is 0.94) and the degree of grassing down (correlation coefficient is 0.54). The more time has passed since the termination of agricultural activity, the higher the quantity of undergrowth and the further it spreads from the forest edges. At 10 years of non-use, the undergrowth occurs up to a distance of 50 m, and already at 20–25 years it appears at a distance of 90 m from the forest edge. The range of propagation of undergrowth from the forest edge is not affected by such characteristics of the field as the type of use and the particle-size composition of soil. The total density of undergrowth decreases at a distance from the forest edge from 10,000 (0–30 m) to 1,600 (80–90 m) pcs/ha. These figures for the economically valuable species, such as spruce and pine, are from 7,533 (10 m from the forest edge) to 800 (90 m from the forest edge) pcs/ha and from 2,533 to 400 pcs/ha, respectively. The species spectrum of undergrowth corresponds to the woody vegetation composition within the forest edges adjacent to the fields and includes pine, spruce, birch, alder, and aspen. Aspen disappears from the species composition with a distance of 30 m from the forest edge. The species ratio in the undergrowth composition varies, however the dominant species are spruce and pine at different distances from the forest edges.

For citation: Feklistov P.A., Averina M.V., Bolotov I.N., Filippov B.Yu., Klevtsov D.N. Changes in Density and Species Composition of Undergrowth at Different Distances from the Forest Edges in Postagrogenic Areas. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 88–98. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-1-88-98](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-88-98)

Funding: The studies were carried out within the framework of the state assignment of the Federal Center for Integrated Arctic Research of the Russian Academy of Sciences (project No. 0409-2019-0039; No. ГР АААА-А18-118011690221-0).

Keywords: undergrowth, tree species, density of undergrowth, height of undergrowth, postagrogenic lands.

Поступила 25.01.19 / Received on January 25, 2019

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-99-112

РОСТ И ПРОДУКТИВНОСТЬ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ С.В. АЛЕКСЕЕВА НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРЕ РОССИИ

Д.Н. Солдатова¹, аспирант, ст. специалист; ORCID: [0000-0001-7865-4969](https://orcid.org/0000-0001-7865-4969)

А.С. Ильинцев², канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [N-6286-2019](https://orcid.org/N-6286-2019),

ORCID: [0000-0003-3524-4665](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665)

¹Министерство природных ресурсов и лесопромышленного комплекса Архангельской области, ул. Выучейского, д. 18, г. Архангельск, Россия, 163000;

e-mail: dashas38@yandex.ru

²Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: a.ilintsev@narfu.ru

В современных условиях посев и посадка в лесах Европейского Севера являются важнейшими лесокультурными мероприятиями, гарантирующими возобновление хвойных пород. Отсутствие актуальной информации об историческом опыте создания лесных культур и современном состоянии подобных объектов – показатель определенного информационного вакуума. Цель исследования – оценка роста и продуктивности опытных лесных культур сосны северного лесовода С.В. Алексеева, созданных методом посева в 1928–1930 гг., и сравнение их с естественными древостоями. Исследования проводили на стационарном объекте «Опытные лесные культуры сосны С.В. Алексеева», расположенном в центральной части Архангельской области. На участке произрастают самые старые на Европейском Севере России опытные лесные культуры. С.В. Алексеев использовал различные варианты лесных культур для того, чтобы подобрать рациональные способы их создания. В 2018 г. были обследованы лесные культуры на 4 постоянных пробных площадях. Сбор, обработку и анализ полевого материала проводили по методикам, принятым в лесной таксации. Определяли: средние диаметр и высоту, относительную и абсолютную полноту, класс бонитета, запас, состав древостоя, средний прирост и текущий среднепериодический прирост по запасу. Динамика таксационных показателей лесных культур за 1999–2018 гг. свидетельствует о том, что все элементы леса находятся в фазе активного роста. За 19-летний период сократилась доля участия сосны в составе древостоя на 3...10 %, но увеличились доли ели (на 3...7 %) и березы (на 2...3 %). При этом в лесных культурах снизилось на 3...36 % число деревьев всех пород, что составило 1420...1952 шт./га. Сумма площадей сечений возросла на 3,6...11,6 м²/га; запас древостоев повысился на 88...133 м³/га; текущий среднепериодический прирост лесных культур по запасу колеблется от 4,63 до 7,00 м³/га. Анализ таксационных показателей исследуемых древостоев показывает, что лесные культуры не уступают в росте нормальным сосновым древостоям Архангельской области. Общая их густота превышает густоту нормальных сосновых древостоев на 29,4...125,7 %. К 90-летнему возрасту общие запасы лесных культур составляют 416...444 м³/га (в том числе сосны – 284...342 м³/га), их средний прирост по запасу – 4,6...5,0 м³/га (в том числе сосны – 3,2...3,8 м³/га). Установлено, что по комплексу таксационных показателей (густоте, запасу, приросту, доле участия сосны в составе) лесные культуры, произрастающие на пробной площади 3 (вариант 8), являются лучшим вариантом из обследуемых по продуктивности. Опыты С.В. Алексеева свидетельствуют, что методом посева семян можно обеспечить гарантированное лесовосстановление сосны в условиях Европейского Севера России.

Для цитирования: Солдатова Д.Н., Ильинцев А.С. Рост и продуктивность лесных культур сосны С.В. Алексеева на Европейском Севере России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 99–112. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-99-112

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке министерства образования и науки Архангельской области в рамках конкурса научных проектов «Молодые ученые Поморья» (проект № 11-2019-02а).

Благодарность: Авторы выражают искреннюю благодарность А.П. Богданову, Р.А. Ершову, Ю.С. Быкову, А.В. Парамонову за участие в сборе полевого материала, а также научным руководителям проф. Н.А. Бабичу и проф. С.В. Третьякову за методическую помощь.

Ключевые слова: лесные культуры, сосна, метод посева, прирост, продуктивность, запас, памятник природы регионального значения.

Введение

Успешное воспроизводство хвойных древесных пород в районах интенсивного использования лесов является одной из основных задач лесного хозяйства не только в России, но и в зарубежных странах.

Воспроизводство лесов может быть естественным и искусственным, при котором должно обеспечиваться увеличение продуктивности и повышение количественных и качественных характеристик леса, включая защитные функции и экосистемные услуги. Там, где в хозяйственно приемлемые сроки не происходит естественное возобновление хвойных древесных пород, проводится искусственное лесовосстановление. В результате его предотвращается смена древесных пород, сокращается лесовозобновительный период, создается возможность выращивания высокопродуктивных насаждений необходимого состава и целевого назначения. Все это способствует рациональному использованию земель лесного фонда.

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) выступает одним из распространенных видов хвойных пород в северном полушарии, являясь наиболее важным лесообразующим видом в Восточной и Центральной Европе [14].

Лесовосстановление проводят посадкой, посевом и путем содействия естественному лесовозобновлению [10]. В практике лесного хозяйства различных стран наиболее часто применяют метод посадки лесных культур.

Зарубежные исследователи [12, 17, 22] отмечают, что основными причинами, по которым посева семян сейчас так редки, служит риск неудачного лесовозобновления из-за большего влияния стрессовых биотических и абиотических факторов на прорастание семян, чем на посадку сеянцев. При этом метод посева семян имеет достаточно преимуществ. Во-первых, трудозатраты на лесовосстановление ниже, чем на посадку сеянцев [1, 8, 21], во-вторых, посев семян имитирует естественное лесовозобновление, в-третьих, лесные насаждения, образовавшиеся таким способом и произрастающие при большой плотности, характеризуются высоким качеством древесины [10].

Сравнительные исследования показывают, что при лесовозобновлении методом посева всходы сосны обыкновенной и других древесных пород растут медленнее и реже выживают, чем, например, посаженные сеянцы [13]. Для того, чтобы создать оптимальные условия для прорастания семян и роста самосева на сплошных вырубках, рекомендуется проводить механическую обработку почвы [15], в первую очередь в целях ограничения конкуренции с другими древесными породами за свет, воду и питательные вещества [19]. Механическая обработка почвы изменяет ее физические (содержание доступной влаги, аэрацию, температуру, плотность сложения почвы) и химические (содержание органических веществ, наличие питательных веществ, кислот-

ность) свойства [11]. Влияние механической обработки почвы на всхожесть семян, а также на рост и выживаемость самосева варьирует в зависимости от климатических факторов, типа лесорастительных условий на участках и древесных пород [16, 18, 20].

Долгосрочные научно-обоснованные наблюдения за стационарными объектами позволяют получить более полную картину, внести коррективы в сложившиеся представления о динамике роста и развития древостоев. Поэтому исторический, научный и практический интерес к постоянным объектам, например к опытным лесным культурам сосны С.В. Алексеева 1927–1930 гг., высок.

Цель исследования – анализ роста и продуктивности опытных лесных культур сосны С.В. Алексеева, созданных методом посева в 1927–1930 гг., и сравнение полученных результатов с показателями древостоев естественно-го происхождения.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены на стационарном объекте «Опытные лесные культуры сосны С.В. Алексеева 1927–1930 гг.», расположенном в Северном участковом лесничестве Обозерского лесничества Архангельской области. Объект исследования находится в северотаежном лесном районе европейской части Российской Федерации (подзона северной тайги) [6] и представляет особую ценность в связи с тем, что здесь произрастают самые старые опытные культуры на Европейском Севере России.

В качестве метода создания лесных культур С.В. Алексеев выбрал посев, поскольку он ближе к природе и формирует насаждения более высокого качества [9]. Им был подобран участок на месте чересполосной условно-сплошной рубки, которая была проведена в зимний период 1916–1917 гг. До рубки на участке произрастал смешанный древостой со следующей таксационной характеристикой: состав 7С3Еед.Лц, Б; полнота 0,6; запас около 250 м³/га; возраст главной породы 200–220 (+150) лет; средняя высота 23 м; средний диаметр 33 см. Тип леса – сосняк черничник. Рубку проводили лесосеками шириной 107 м с оставлением семенников сосны. Участок подвергался пожарам в 1919 и 1925 гг., что привело к образованию пустыря общей площадью около 200 га с очень редкими соснами. В связи с рубками и пожарами на участке сложилась неблагоприятная обстановка для естественного обсеменения, даже вблизи стен леса оно было неудовлетворительное [1]. Поэтому С.В. Алексеев предложил один из вариантов быстрого возобновления – посев семян сосны.

В 1927–1930 гг. он заложил различные варианты лесных культур для того, чтобы подобрать рациональные способы их создания, которые бы обеспечили успешное лесовосстановление сосны. Обработка почвы для посева производилась частичная: местами площадками и при различных расстояниях между ними (табл. 1).

После посева лесных культур в 1930 г. была проведена частичная инвентаризация, которая показала, что все способы создания лесных культур были близки между собой, только отличался вариант с огневой подготовкой почвы. Однако С.В. Алексеев отмечал, что вывод является предварительным, так как этот способ требует дальнейшей проработки и проверки [1].

Таблица 1

**Способы подготовки почвы по вариантам создания культур
(по данным С.В. Алексеева, 1932 г. [1])**

ПП*	Вариант**	Год создания	Площадь, га	Размер площадок, м	Расстояние между центрами площадок, м	Число площадок, шт./га	Площадь обработанная, %	Способы обработки почвы
2	4	1928–1929	1,00+0,82	1×1	2,5×2,5	1600	16	Обработка площадками. Сдирание и удаление задернелых участков. Мелкое рыхление на глубину 6...7 см
3	8	1929–1930	0,50+0,64	1×1	2,5×2,5	1600	16	Создание холмика в площадке после предварительного удаления задернелых участков
16	6	1929	1,50	4×4	10,0×10,0	100	16	Обработка площадками. Сдирание и удаление задернелых участков. Мелкое рыхление на глубину 6...7 см
19	9	1929–1930	0,50+0,67	1×1	2,5×2,5	1600	16	Создание холмика в площадке на необработанной площади, только с краев площадки удалялись задернелые участки

*ПП – постоянная пробная площадь. **Номер варианта создания лесных культур.

В 1936 г. С.В. Алексеев обследовал отдельные варианты. В выводах он отметил, что бóльшая часть здоровых культур находится по краям площадок и борозд, куда сгребали лесную подстилку. Во всех вариантах удаление дернины и органомогенного горизонта отрицательно сказалось на росте культур. При этом для учтенных вариантов, кроме варианта 4, он поставил неудовлетворительную оценку. В том же году Ф.Б. Орлов обследовал некоторые варианты культур и сделал схожий с С.В. Алексеевым вывод [5].

Детальное обследование лесных культур, проведенное С.В. Алексеевым в 1951–1952 гг., позволило ему сделать заключение, что к 22–25-летнему возрасту наибольшие изменения произошли внутри гнезд, особенно в перегущенных площадках. Например, в вариантах размером 1×1 м, среднее количество деревьев на площадке составляло 10,0–13,0 шт., в варианте 6 с размером площадок 4×4 м – 54,7 шт. Сохранность лесных культур в густых посевах была в 2 раза выше, чем в редких. Такое различие С.В. Алексеев объяснил характерным для Севера явлением – выжиманием сеянцев морозом. Запас сосны искусственного происхождения колебался по вариантам создания от 25 (вари-

Сбор, обработку и анализ полевого материала, собранного на ПП, производили по общепринятым в лесной таксации методикам [2].

На ПП был проведен сплошной пересчет деревьев с измерением диаметров по точной шкале на высоте 1,3 м. К древостою относили все деревья, которые достигли диаметра 6 см, остальные – к подросту. Для выявления фауности древостоев отмечали случаи повреждений деревьев с указанием характера повреждения (суховершинность, кривизна, плодовые тела и т. д.).

Для определения средней высоты древесного яруса главной породы и других пород измеряли высоты у 15...20 деревьев с помощью ультразвукового высотомера, дальномера и угломера Haglof Vertex IV/60 (точность $\pm 0,1$ м). У древесных пород, которые имели менее 3 ед. в составе, определяли по 3 высоты из трех центральных ступеней толщины.

Таксационную характеристику древостоев на ПП устанавливали общепринятыми способами: средний диаметр – через среднюю площадь сечения; среднюю высоту – по графику высот (по средней арифметической); относительную полноту – в соответствии со стандартной таблицей ЦНИИЛХ; класс бонитета – по бонитировочной шкале М.М. Орлова. Запас определяли по местным объемным таблицам [4], состав древостоя – по запасу пород, участвующих в нем.

Результаты исследования и их обсуждение

Таксационная характеристика лесных культур на ПП 2, 3, 16 и 19 по состоянию на 1999 и 2018 г. представлена в табл. 2.

Таблица 2

Таксационная характеристика лесных культур на ПП по состоянию на 1999 и 2018 г.

ПП	Вариант	Порода	Доля в запасае, %	Возраст, лет	Средние		Число деревьев, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
					высота, м	диаметр, см				
<i>По состоянию на 1999 г. (данные Л.Ф. Ипатова [5])</i>										
2	4	С	71	71	17,5	17,4	1200	28,6	0,86	263
		Е	13	59	9,2	8,0	1672	8,4	0,44	43
		Б	10	72	22,0	19,0	120	3,4	0,12	34
		Ос	5	72	22,2	20,1	32	1,8	0,05	15
		Лц	1	–	13,1	12,1	32	0,4	–	3
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	3056	42,6	1,47	358
3	8	С	88	70	20,5	20,3	790	25,5	0,70	271
		Е	8	63	10,2	9,8	585	4,4	0,22	25
		Б	4	71	18	13,8	95	1,4	0,06	12
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	1470	31,3	0,98	308
16	6	С	77	70	21,2	22,4	609	24,1	0,64	264
		Е	11	59	9,1	8,2	1371	7,2	0,38	37
		Б	11	71	19,6	15,7	223	4,3	0,17	39
		Ос	1	70	17,3	13,6	14	0,2	0,01	2
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	2217	35,8	1,20	342
19	9	С	75	70	21,0	20,9	713	24,2	0,65	266
		Е	15	59	9,2	8,6	1743	10,1	0,53	54
		Б	10	70	19,0	15,0	226	3,9	0,15	35
		Ос	–	70	22,0	20,0	4	0,1	0,00	1
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	2686	38,3	1,33	356

Окончание табл. 2

ПП	Вариант	Порода	Доля в запасае, %	Возраст, лет	Средние		Число деревьев, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
					высота, м	диаметр, см				
<i>По состоянию на 2018 г.</i>										
2	4	С	68	90	20,1	21,9	762	28,7	0,79	284
		Е	19	78	13,6	14,5	1050	13,2	0,51	78
		Б	9	91	17,6	18,2	115	3,0	0,11	39
		Ос	4	91	24,0	26,7	25	1,3	0,03	15
		Лц	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	1952	46,2	1,44	416
3	8	С	78	89	23,0	24,3	660	30,7	0,78	342
		Е	15	82	16,3	16,1	625	10,0	0,33	67
		Б	7	90	17,7	14,5	135	2,2	0,08	32
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	1420	42,9	1,19	441
16	6	С	72	89	23,7	26,4	491	26,9	0,67	308
		Е	14	78	14,4	13,7	783	9,0	0,33	63
		Б	13	90	19,8	19,2	143	4,1	0,14	58
		Ос	1	89	24,7	32,0	4	0,3	0,01	4
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	1421	40,3	1,15	433
19	9	С	66	89	23,1	24,5	555	26,2	0,66	292
		Е	20	78	15,0	14,4	1055	13,5	0,48	91
		Б	13	89	21,2	17,4	160	3,8	0,12	58
		Ос	1	89	24,6	26,0	5	0,3	0,01	3
<i>Итого</i>		–	100	–	–	–	1775	43,8	1,27	444

Анализ таксационных показателей исследуемых древостоев за 19-летний период свидетельствует о том, что все элементы леса активно растут.

Динамика таксационных показателей лесных культур по данным за 1999–2018 гг. представлена в табл. 3.

Во всех исследуемых вариантах лесных культур отмечаются следующие особенности по элементам леса.

Средняя высота *сосны* увеличилась на 2,1...2,6 м, средний диаметр – на 3,6...4,5 см. При этом наблюдается снижение числа деревьев на 118...438 шт./га. Сумма площадей сечений возросла на 0,1...5,2 м²/га. Полнота на ПП 1 незначительно снизилась на 0,07, на других – повысилась на 0,01...0,08. Запас во всех случаях увеличился на 21...71 м³/га, но при этом доля в составе сократилась на 3...10 %. Текущий среднепериодический прирост *сосны* по запасу варьирует от 1,11 до 3,74 м³/га.

Средняя высота *ели* увеличилась на 4,4...6,1 м, средний диаметр – на 5,5...6,5 см. На ПП 2, 16 и 19 наблюдается снижение числа деревьев на 438...688 шт./га, на ПП 3 – рост на 40 шт./га. Сумма площадей сечений возросла на 1,8...5,6 м²/га. Полнота на ПП 2 и 3 незначительно увеличилась на 0,07...0,11, на других – она снизилась на 0,05. Запас во всех случаях повысился на 26...42 м³/га, доля *ели* в составе увеличилась на всех ПП на 3...7 %. Текущий среднепериодический прирост *ели* по запасу варьирует от 1,36 до 2,21 м³/га.

Средняя высота *березы* на ПП 2 и 3 снизилась на 0,3...4,4 м, на других – повысилась на 0,2...2,2 м. Средний диаметр на ПП 2 уменьшился на 0,8 см, на остальных – повысился на 0,7...3,5 см. На ПП 2, 16 и 19 наблюдается снижение числа деревьев на 5...80 шт./га, на ПП 3 – увеличение на 40 шт./га.

Таблица 3

**Динамика таксационных показателей лесных культур на ПП
с 1999 по 2018 г.**

ПП	Вариант	Порода	Доля в запасе, %	Средние		Число деревьев, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
				высота, м	диаметр, см				
2	4	С	-3	2,6	4,5	-438	0,1	-0,07	21
		Е	6	4,4	6,5	-622	4,8	0,07	35
		Б	-1	-4,4	-0,8	-5	-0,4	-0,01	5
		Ос	-1	1,8	6,6	-7	-0,5	-0,02	0
		Лц	-1	-	-	-	-	-	-3
<i>Итого</i>		-	-	-	-	-1104	3,6	-0,03	58
3	8	С	-10	2,5	4,0	-130	5,2	0,08	71
		Е	7	6,1	6,3	40	5,6	0,11	42
		Б	3	-0,3	0,7	40	0,8	0,02	20
<i>Итого</i>		-	-	-	-	-50	11,6	0,21	133
16	6	С	-5	2,5	4,0	-118	2,8	0,03	44
		Е	3	5,3	5,5	-588	1,8	-0,05	26
		Б	2	0,2	3,5	-80	-0,2	-0,03	19
		Ос	0	7,4	18,4	-10	0,1	0	2
<i>Итого</i>		-	-	-	-	-796	4,5	-0,05	91
19	9	С	-9	2,1	3,6	-158	2,0	0,01	26
		Е	5	5,8	5,8	-688	3,4	-0,05	37
		Б	3	2,2	2,4	-66	-0,1	-0,03	23
		Ос	1	2,6	6,0	1	0,2	0,01	2
<i>Итого</i>		-	-	-	-	-911	5,5	-0,06	88

Средние высота и диаметр *осины* увеличились соответственно на 1,8...7,4 м и 6,0...18,4 см. При этом наблюдается снижение числа деревьев на 7...10 шт./га, кроме ПП 19. Сумма площадей сечений на ПП 2 уменьшилась на 0,5 м²/га, на остальных – повысилась на 0,1...0,2 м²/га. Полнота на всех ПП незначительно изменилась. На ПП 2 запас остался прежним, на ПП 16 и 19 – возрос на 2 м³/га. Доля *осины* в составе практически не изменилась. Текущий среднепериодический прирост *осины* по запасу варьирует от 0 до 0,11 м³/га.

Лиственница была отмечена только на ПП 2 в 1999 г., к моменту последнего обследования она полностью выпала из состава насаждения.

Во всех исследуемых вариантах создания лесных культур к 90-летнему возрасту сформировались достаточно густые древостои (табл. 4).

За счет части естественного возобновления сосны, ели, березы и *осины* количество растущих деревьев в лесных культурах больше по сравнению с чистыми нормальными сосняками II класса бонитета на 64,2...125,7 %, с чистыми сосняками черничными – на 29,4...77,9 %, с сосново-березовыми насаждениями – на 33,2...83,1 %.

Число растущих деревьев сосны в лесных культурах меньше по сравнению с чистыми нормальными сосняками II класса бонитета на 11,9...35,8 %, с чистыми нормальными сосняками черничными – на 30,5...55,2 %, по сравнению с сосново-березовыми древостоями – на 12,6...54,6 %, за исключением ПП 16, где разница составила 0,4 %.

Таблица 4

**Густота лесных культур и естественных древостоев в 90-летнем возрасте
(по данным различных авторов)**

Древостой	Число растущих деревьев, шт./га		Различие с культурами, %	
	сосны	всех пород	сосны	всех пород
Опытные культуры С.В. Алексеева:				
ПП 2 (вариант 4)	762	1952	–	–
ПП 3 (вариант 8)	660	1420	–	–
ПП 16 (вариант 6)	491	1421	–	–
ПП 19 (вариант 9)	555	1775	–	–
Чистые сосняки II класса бонитета (ТХР по В.И. Левину) [4]	865	865	11,9	–125,7
			23,7	–4,2
			43,2	–64,3
			35,8	–105,2
Чистые сосняки черничные (ТХР по В.И. Левину) [4]	1097	1097	30,5	–77,9
			39,8	–29,4
			55,2	–29,5
			49,4	–61,8
Сосново-березовые древостои, тип леса черничник III класса бонитета (ТХР по О.А. Неволину) [4]	493	1066	–54,6	–83,1
			–33,9	–33,2
			0,4	–33,3
			–12,6	–66,5

Показателем довольно высокой продуктивности опытных лесных культур служит класс бонитета, который варьирует от III до II. По общему запасу лесные культуры не уступают нормальным древостоям Архангельской области (табл. 5).

Таблица 5

**Запас лесных культур и естественных древостоев в 90-летнем возрасте
(по данным наблюдений различных авторов)**

Древостой	Запас растущих деревьев, м ³ /га		Различие с культурами, %	
	сосны	всех пород	сосны	всех пород
Опытные культуры С.В. Алексеева:				
ПП 2 (вариант 4)	284	416	–	–
ПП 3 (вариант 8)	342	441	–	–
ПП 16 (вариант 6)	308	433	–	–
ПП 19 (вариант 9)	292	444	–	–
Чистые сосняки II класса бонитета (ТХР по В.И. Левину) [4]	435	435	34,7	4,4
			21,4	–1,4
			29,2	0,5
			32,9	–2,1
Чистые сосняки черничные (ТХР по В.И. Левину) [4]	333	333	11,3	–19,1
			–2,1	–24,8
			5,7	–23,0
			9,4	–19,5
Сосново-березовые древостои, тип леса черничник III класса бонитета (ТХР по О.А. Неволину) [4]	225	312	–13,6	–23,9
			–26,9	–29,7
			–19,1	–27,8
			–15,4	–24,4

Сравнение запасов лесных культур на опытных участках с естественными нормальными сосняками II класса бонитета показало, что запас всех растущих деревьев только на ПП 3 не уступает им, в остальных вариантах исследования различие составляет 0,5...4,4 %. Однако, если рассматривать отдельно запас растущих деревьев сосны, то он меньше на 21,4...34,7 %.

Запас лесных культур во всех исследуемых вариантах превышает запас чистых нормальных сосняков черничных на 19,1...24,8 %, при этом запас растущих деревьев сосны на ПП ниже на 5,7...11,3 %, кроме ПП 3, где он выше на 2,1 %.

Запасы лесных культур и растущих деревьев сосны превосходят запасы сосново-березовых древостоев на 24,4...29,7 и 13,6...26,9 % соответственно.

Средний прирост культур и естественных древостоев по запасу в 90-летнем возрасте представлен в табл. 6.

Таблица 6

Средний прирост лесных культур и естественных древостоев по запасу в 90-летнем возрасте (по данным наблюдений различных авторов)

Древостой	Средний прирост по запасу, м ³ /га		Различие с культурами, %	
	сосны	всех пород	сосны	всех пород
Опытные культуры С.В. Алексева:				
ПП 2 (вариант 4)	3,2	4,6	–	–
ПП 3 (вариант 8)	3,8	5,0	–	–
ПП 16 (вариант 6)	3,5	4,9	–	–
ПП 19 (вариант 9)	3,3	4,7	–	–
Чистые сосняки II класса бонитета (ТХР по В.И. Левину) [4]	4,9	4,9	34,7	6,1
			22,4	–2,0
			28,6	0,0
			32,7	4,1
Чистые сосняки черничные (ТХР по В.И. Левину) [4]	3,8	3,8	15,8	–21,1
			0,0	–31,6
			7,9	–28,9
			13,2	–23,7
Сосново-березовые древостои, тип леса черничник III класса бонитета (ТХР по О.А. Неволину) [4]	2,7	3,7	–18,5	–24,3
			–40,7	–35,1
			–29,6	–32,4
			–22,2	–27,0

Сравнение среднего прироста по запасу лесных культур и естественных сосняков II класса бонитета показало, что средний прирост всех пород практически не уступает и даже больше на ПП 3, но на ПП 2 и 19 – меньше на 4,1...6,1 %. Однако средний прирост сосны по запасу меньше на 22,4...34,7 %.

Средний прирост лесных культур по запасу на всех ПП превышает средний прирост по запасу сосняков черничных на 21,1...31,6 %, но средний прирост сосны по запасу ниже на некоторых ПП на 7,9...15,8 %.

Средний прирост лесных культур по запасу, включая средний прирост сосны на всех ПП, выше по сравнению со средним приростом сосново-березовых древостоев на 24,3...35,1 и 18,5...40,7 % соответственно.

Заключение

В целом за период с 1999 по 2018 г. во всех вариантах создания лесных культур сократилась доля участия сосны в составе древостоя на 3...10 % и увеличились доли ели (на 3...7 %) и березы (на 2...3 %). При этом в лесных культурах снизилось число деревьев всех пород до 1420...1952 шт./га. Сумма площадей сечений увеличилась на 3,6...11,6 м²/га. Полнота уменьшилась на 0,02–0,05 везде, кроме ПП 3, где она повысилась на 0,21 за счет перехода части ели и березы из стадии подроста в древостой. Запас древостоя увеличился на 88...133 м³/га. Текущий среднепериодический прирост насаждений колеблется от 4,63 до 7,00 м³/га.

По сравнению с таблицами хода роста нормальных сосновых древостоев Архангельской области в лесных культурах количество деревьев сосны значительно меньше, но общая густота всех деревьев выше на 29,4...125,7 %.

К 90-летнему возрасту общие запасы лесных культур достигли высоких показателей для северотаежных лесов и составляют 416...444 м³/га, в том числе на сосну приходится 284...342 м³/га, что не уступает нормальным древостоям Архангельской области.

Средний прирост лесных культур по запасу во всех случаях превышает данный показатель для сосново-березовых древостоев и частично для чистых нормальных сосняков черничных, но уступает показателю чистых нормальных сосняков II класса бонитета.

По комплексу таксационных показателей (густоте, запасу, приросту, доле участия сосны в составе) лесные культуры, произрастающие на ПП 3 (вариант 8), являются лучшим вариантом из обследуемых. В данном варианте обработка почвы производилась методом создания холмика в площадке после предварительного удаления задернелых участков.

Опыт создания первых лесных культур методом посева семян в северотаежных условиях показал, что лесовосстановление может быть удачным и при этом формируются высокопроизводительные древостои.

Таким образом, результаты нашей работы дополняют существующие лесохозяйственные знания о лесовосстановлении сосновых лесов на Европейском Севере России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев С.В. К вопросу о плодоношении и искусственном возобновлении лесов Севера. Архангельск: Сев. краевое изд-во, 1932. 48 с. [Alekseev S.V. *To the Issue of Fruiting and Artificial Renewal of Forests in the North*. Arkhangelsk, Severnoye kraevoye izdatel'stvo, 1932. 48 p.]
2. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. [Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.]
3. Борисов В.И. Особенности выращивания сосны на Севере // Лесн. хоз-во. 1964. № 1. С. 38–41. [Borisov V.I. Features of Pine Growing in the North. *Lesnoye khozyaystvo*, 1964, no. 1, pp. 38–41].
4. Гусев И.И., Калинин В.И., Неволин О.А., Нефедов Н.М., Шишкин Н.А. Полевой справочник таксатора: (Для таежных лесов Европейского Севера). Вологда: Сев.-зап. кн. изд-во, 1971. 196 с. [Gusev I.I., Kalinin V.I., Nevolin O.A., Nefedov N.M.,

Shishkin N.A. *Estimator's Field Handbook (For Taiga Forests of the European North)*. Vologda, Severo-zapadnoye knizhnoye izdatel'stvo, 1971. 196 p.].

5. *Инамов Л.Ф.* Опытные культуры С.В. Алексеева. Архангельск: 2003. 100 с. [Pratov L.F. *Experimental Forest Crops Named after S.V. Alekseev*. Arkhangelsk, 2003. 100 p.].

6. Об утверждении Перечня лесорастительных зон и Перечня лесных районов Российской Федерации: приказ Минприроды России от 18.08.2014 № 367. Режим доступа: gosleshoz.gov.ru (дата обращения: 30.01.2019). [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation "On Approval of the List of Forest Site Zones of the Russian Federation and the List of Forest Districts of the Russian Federation" of August 18, 2014. No. 367].

7. *Прокопьев М.Н.* Культуры С.В. Алексеева в Обозерском лесхозе. М.: ЦБНТИ-лесхоза, 1977. 30 с. [Prokop'yev M.N. *Forest Crops Named after S.V. Alekseev in Obozerskiy Forestry*. Moscow, TsBNTI-leskhoza Publ., 1977. 30 p.].

8. *Прокопьев М.Н.* Культуры сосны в таежной зоне. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 136 с. [Prokop'yev M.N. *Pine Crops in the Taiga Zone*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1981. 136 p.].

9. *Редько Г.И., Бабич Н.А.* Рукотворные леса Европейского Севера. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1991. 94 с. [Red'ko G.I., Babich N.A. *Artificial Forests of the European North*. Arkhangelsk, Severo-zapadnoye knizhnoye izdatel'stvo, 1991. 94 p.].

10. Aleksandrowicz-Trzcińska M., Drozdowski S., Wołczyk Z., Bielak K., Żybura H. Effects of Reforestation and Site Preparation Methods on Early Growth and Survival of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in South-Eastern Poland. *Forests*, 2017, vol. 8(11), art. 421. DOI: [10.3390/f8110421](https://doi.org/10.3390/f8110421)

11. Archibold O.W., Acton C., Ripley E.A. Effect of Site Preparation on Soil Properties and Vegetation Cover, and the Growth and Survival of White Spruce (*Picea glauca*) Seedlings, in Saskatchewan. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 131, iss. 1-3, pp. 127–141. DOI: [10.1016/S0378-1127\(99\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00205-4)

12. De Chantal M., Leinonen K., Ilvesniemi H., Westman C.J. Combined Effects of Site Preparation, Soil Properties, and Sowing Date on the Establishment of *Pinus silvestris* and *Picea abies* from Seeds. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 5, pp. 931–945. DOI: [10.1139/x03-011](https://doi.org/10.1139/x03-011)

13. Hyytiäinen K., Ilomäki S., Mäkelä A., Kinnunen K. Economic Analysis of Stand Establishment for Scots Pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 36, no. 5, pp. 1179–1189. DOI: [10.1139/x06-023](https://doi.org/10.1139/x06-023)

14. Krakau U.K., Liesebach M., Aronen T., Lelu-Walter M.A., Schneck V. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forest Tree Breeding in Europe*. Ed. by L.E. Pâques. Dordrecht, Springer, 2013, pp. 267–323. DOI: [10.1007/978-94-007-6146-9_6](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6146-9_6)

15. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, iss. 5-6, pp. 825–848. DOI: [10.1007/s11056-012-9332-x](https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x)

16. MacKenzie M.D., Schmidt M.G., Bedford L. Soil Microclimate and Nitrogen Availability 10 Years after Mechanical Site Preparation in Northern British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 8, pp. 1854–1866. DOI: [10.1139/X05-127](https://doi.org/10.1139/X05-127)

17. Mäkitalo K. Effect of Site Preparation and Reforestation Method on Survival and Height Growth of Scots Pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 6, pp. 512–525. DOI: [10.1080/02827589908540816](https://doi.org/10.1080/02827589908540816)

18. Munson A.D., Timmer V.R. Soil Nitrogen Dynamics and Nutrition of Pine Following Silvicultural Treatments in Boreal and Great Lakes – St. Lawrence Plantations. *Forest Ecology and Management*, 1995, vol. 76, iss. 1-3, pp. 169–179. DOI: [10.1016/0378-1127\(95\)03547-N](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03547-N)

19. Nilsson U., Örlander G. Vegetation Management on Grass-Dominated Clearcuts Planted with Norway Spruce in Southern Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 29, no. 7, pp. 1015–1026. DOI: [10.1139/x99-071](https://doi.org/10.1139/x99-071)

20. Wallertz K., Malmqvist C. The Effect of Mechanical Site Preparation Methods on the Establishment of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Southern Sweden. *Forestry*, 2013, vol. 86, iss. 1, pp. 71–78. DOI: [10.1093/forestry/cps065](https://doi.org/10.1093/forestry/cps065)

21. Wennström U., Bergsten U., Nilsson J.-E. Seedling Establishment and Growth after Direct Seeding with *Pinus sylvestris*: Effects of Seed Type, Seed Origin, and Seeding Year. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41, no. 2, pp. 299–314. DOI: [10.14214/sf.298](https://doi.org/10.14214/sf.298)

22. Willoughby I., Jinks R.L., Kerr G., Gosling P.G. Factors Affecting the Success of Direct Seeding for Lowland Afforestation in the UK. *Forestry*, 2004, vol. 77, iss. 5, pp. 467–482. DOI: [10.1093/forestry/77.5.467](https://doi.org/10.1093/forestry/77.5.467)

GROWTH AND PRODUCTIVITY OF PINE FOREST CROPS NAMED AFTER S.V. ALEKSEEV IN THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA

*D.N. Soldatova*¹, Postgraduate Student, Senior Specialist; ORCID: [0000-0001-7865-4969](https://orcid.org/0000-0001-7865-4969)
*A.S. Ilintsev*², Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [N-6286-2019](https://orcid.org/N-6286-2019),
ORCID: [0000-0003-3524-4665](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665)

¹Ministry of Natural Resources and Forest Industry Complex of Arkhangelsk Region, ul. Yuचेyskogo, 18, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: dashas38@yandex.ru

²Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: a.ilintsev@narfu.ru

Sowing and planting of forests in the European North are the most important silvicultural treatment that guarantee the regeneration of coniferous species in present-day conditions. Lack of relevant information on the historical experience of forest crop development and current state of such objects is an indicator of a certain information vacuum. The research purpose was to assess growth and productivity of experimental forest crops of pine of the northern arborist S.V. Alekseev developed by the sowing method in 1927–1930 and to compare them with natural stands. The research was carried out at the stationary site “Experimental Forest Crops of Pine named after S.V. Alekseev”, which is located in the central part of Arkhangelsk region. The oldest experimental forest crops in the European North of Russia grow on the site. S.V. Alekseev used different forest crops in order to choose rational ways of their development. We examined forest crops at 4 permanent sample plots in 2018. Collection, processing and analysis of field data was carried out according to the methods generally accepted in forest inventory. The following parameters were determined: average diameter and height, relative and absolute density, quality class, standing volume, stand composition, mean increment, and current mean periodic increment. The dynamics of inventory parameters of forest crops for the period from 1999 to 2018 shows that all forest elements are in a phase of active growth. Over the 19-year period, the share of pine in the stand decreased by 3–10 %, while the share of spruce and birch increased by 3–7 % and by 2–3 %, respectively. Herewith the number of trees of all species decreased by 3–36 % and amounted to 1420–1952 pcs/ha in forest crops. The total cross-sectional area increased by 3.6–11.6 m²/ha. The standing volume increased by 88–133 m³/ha. The current mean periodic increment of forest crops ranged from 4.6 to 7.0 m³/ha. Analysis of the inventory parameters of the studied stands shows that forest crops are not inferior in growth to normal pine stands of Arkhangelsk region. The total density of forest crops exceeds the density of normal pine stands by 29.4–125.7 %. The total standing volume of forest crops have reached

high levels by the age of 90. The total standing volume of forest crops is 416–444 m³/ha, including pine (284–342 m³/ha). The mean increment of forest crops is 4.6–5.0 m³/ha, including pine (3.2–3.8 m³/ha). Forest crops growing on the 3rd sample plot (option 8) are the best option among those examined by productivity according to the complex of inventory parameters (density, standing volume, increment, pine share in the composition). The experiments of S.V. Alekseev show that the sowing method can provide guaranteed reforestation of pine in the European North.

For citation: Soldatova D.N., Ilintsev A.S. Growth and Productivity of Pine Forest Crops Named after S.V. Alekseev in the European North of Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 99–112. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-99-112

Funding: The study was carried out with the financial support from the Ministry of Education and Science of Arkhangelsk Region within the framework of the competition of scientific projects “Young Scientists of Pomorye” (project No. 11-2019-02a).

Acknowledgments: We gratefully acknowledge A.P. Bogdanov, R.A. Ershov, Yu.S. Bykov, and A.V. Paramonov for participation in the collection of field material, as well as scientific supervisors prof. N.A. Babich and prof. S.V. Tret'yakov for methodological assistance.

Keywords: forest crops, Scots pine, sowing method, increment, productivity, standing volume, natural monument of regional significance.

Поступила 14.03.19 / Received on March 14, 2019



УДК 674.093:630*

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-113-127

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЗАГОТОВКЕ ДРЕВЕСИНЫ В ЛЕСАХ С РАДИОАКТИВНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ

А.Н. Заикин¹, д-р техн. наук, доц.; ORCID: [0000-0002-1831-6893](https://orcid.org/0000-0002-1831-6893)

А.С. Торопов², д-р техн. наук, проф.; ORCID: [0000-0003-4414-2505](https://orcid.org/0000-0003-4414-2505)

В.М. Меркелов¹, канд. техн. наук, доц.;

В.В. Сиваков¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/R-7264-2019),

ORCID: [0000-0002-0175-9030](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030)

¹Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: Zaikin.Anatolij@yandex.ru, vmerkelov55@mail.ru, svv000@yandex.ru

²Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: ToropovAS@volgatech.net

В связи с техногенными авариями на объектах атомной энергетики, в том числе на Чернобыльской АЭС, часть лесов Российской Федерации подверглась радиоактивному загрязнению, что создало условия, при которых в долгосрочной перспективе невозможно обычное многоцелевое использование леса и лесных ресурсов. Эти леса представляют серьезную экологическую опасность, так как возможен перенос радионуклидов в незараженные зоны вследствие возникновения техногенных и природных пожаров. Заготовка и использование древесины из этих регионов – актуальная задача, которая обеспечивает решение экологических проблем за счет снижения возможности повторного заражения радионуклидами прилегающих территорий. Одним из выходов в данной ситуации является предлагаемая нами технология комплексной переработки загрязненной радионуклидами древесины на основе мобильных комплексов машин и оборудования, работающих непосредственно на лесосеке, с приводом от двигателей внутреннего сгорания или самоходных машин для получения «чистых» пиломатериалов. При этом возникающая необходимость минимизировать продолжительность занятости машин и оборудования может быть достигнута за счет согласованной работы лесосечных машин с мобильным оборудованием по объему перерабатываемой древесины на каждой операции. Согласование объемов выработки машин и оборудования возможно при создании и поддержании (потребление, пополнение и выработка) на определенном для конкретных условий уровне оперативных запасов. С учетом разработанных ранее моделей, предусматривающих увеличение численности и/или сменности работы машин и оборудования на отстающих операциях, определяются режимы функционирования комплекта машин в целом. Данный подход к решению проблемы позволит: обеспечить объем выработки комплекта машин и оборудования, равный объему выработки ведущего оборудования комплекта; сократить количество дней, необходимое для заготовки заданного объема древесины; снизить количество загрязняющих веществ (например, по оксиду углерода), которое двигатели самоходных машин выбрасывают в атмосферу.

Для цитирования: Заикин А.Н., Торопов А.С., Меркелов В.М., Сиваков В.В. Повышение эффективности работы машин и оборудования при заготовке древесины в лесах с радиоактивным загрязнением // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 113–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-113-127

Ключевые слова: радионуклиды, радиоактивное загрязнение, продольный раскрой, переработка отходов, лесосека, комплект машин, хлыст, пиломатериалы.

Введение

В связи с техногенными авариями на объектах атомной энергетики, в том числе на Чернобыльской АЭС, часть лесов Российской Федерации подверглась радиоактивному загрязнению [3, 12, 23, 26, 29], что создало условия, препятствующие обычному многоцелевому их использованию.

Эти леса представляют серьезную экологическую опасность, так как возможен перенос радионуклидов в незараженные зоны [3] вследствие возникновения пожаров из-за причин техногенного и природного характера. Использование заготовленной древесины из этих регионов является весьма актуальной задачей, решение которой обеспечит снижение риска заражения радионуклидами прилегающих территорий [2, 13, 25, 26] и будет способствовать созданию новых рабочих мест.

Согласно Методическим рекомендациям по регламентации лесохозяйственных мероприятий в лесах, загрязненных радионуклидами (Приложение 1 к приказу Рослесхоза № 81 от 16 марта 2009 г.), и Приказу Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 8 июня 2017 г. № 283 «Об утверждении особенностей осуществления профилактических и реабилитационных мероприятий в зонах радиоактивного загрязнения лесов» для зон средней и низкой степени загрязнения лесов:

рекомендуемая технологическим регламентом технология лесосечных работ для лесов с плотностью загрязнения почв цезием-137 в количестве 15...40 Ки/км² предусматривает: заготовку на лесосеках только сортиментов; окорку их на погрузочном пункте (верхнем складе); измельчение отходов лесозаготовок на рубительных машинах; равномерное разбрасывание измельченных отходов по площади лесосеки с использованием выпускаемых машин и механизмов;

если чистовая окорка не позволяет получить древесину с требуемыми показателями по радиоактивному загрязнению, это может быть достигнуто путем обрезки верхних слоев древесины на мобильном лесопильном оборудовании в условиях лесосеки;

допускаются неравномерное разбрасывание измельченных отходов по территории лесосеки и их складирование в штабеля с оставлением на перегнивание при условии соблюдения требований пожарной безопасности.

Повышение мобильности лесопильных установок сделало возможным переработку всей, в том числе и тонкомерной, древесины и производство пиломатериалов непосредственно на месте ее заготовки – на лесосеке [1, 16, 22, 27].

Получение окоренных сортиментов и «чистой» пилопродукции в условиях лесосеки рассматривалось рядом исследователей [5–7, 17, 18, 22, 24]. Эффективный состав лесосечных машин для конкретных условий разработки

лесосек, который позволяет выполнять лесосечные работы при заданных показателях эффективности, представлен в работах [8, 11, 16, 21]. Вопросы расчета режимов работы лесосечных машин (оптимальной величины оперативных запасов древесины между смежными операциями, времени их создания, потребления, пополнения и выработки) и организации их функционирования отражены в [4, 9–11, 20], проблемы снижения негативного воздействия лесосечных машин на лесные экосистемы – в [5, 14, 16, 28]. В то же время авторам неизвестны научные труды, в которых бы решались вопросы согласованной работы лесосечных машин и деревообрабатывающего оборудования.

Лесозаготовительный процесс осуществляют предприятия различных форм собственности, работающие в разных природно-производственных условиях. Организация лесозаготовительного производства зависит от используемых технологических процессов, характеризующихся составом и количеством применяемых машин и оборудования, последовательностью и местом выполнения технологических и транспортно-переместительных операций.

Но независимо от типа применяемого оборудования и используемой технологии существует проблема повышения его эффективности за счет согласования работы лесосечных машин и деревообрабатывающего оборудования для получения «чистых» пиломатериалов на верхнем складе, т. е. за счет повышения объема выработки комплекта машин до объема выработки машин на ведущей операции, снижения продолжительности выполнения заданного объема работ и, как следствие, уменьшения допустимого времени пребывания людей на зараженной территории. Кроме того, актуальным является вопрос снижения техногенного воздействия лесосечных машин на окружающую среду, в частности возможного уменьшения выброса вредных веществ в атмосферу с отработавшими газами. Решению этих проблем и посвящено данное исследование.

Согласование работы лесозаготовительных машин и деревообрабатывающего оборудования, а следовательно, повышение их эффективности, достижение объема выработки комплекта машин, равного объему выработки машин на ведущей операции, уменьшение продолжительности внутрисменных простоев и продолжительности выполнения заданного объема работ, т. е. сокращения времени нахождения людей и техники в зонах радиоактивного загрязнения, позволяет получать готовую продукцию в виде «чистых» пиломатериалов при сокращении количества загрязняющих веществ, которое двигатели самоходных машин выбрасывают в атмосферу, за счет организации технологического процесса по заранее рассчитанным для конкретных условий режимам работы техники на основе разработанных нами математических моделей [4].

Объекты и методы исследования

Получение «чистых» пиломатериалов непосредственно на лесосеке предполагает выполнение ряда технологических операций – валку, трелевку, обрезку сучьев, раскряжевку и продольную распиловку, переработку отходов. Применение ручных бензомоторных инструментов нежелательно.

В целях минимизации вредного воздействия радиации на человека целесообразно использовать машинный способ заготовки, обеспечивающий снижение внутрисменных простоев оборудования за счет роста объемов выработки комплекта машин, уменьшения продолжительности работы на лесосеке.

секе и сокращения количества загрязняющих веществ, выбрасываемых машинами в атмосферу.

Возможно применение различных вариантов комплектов машин. Например, вариант (рис. 1, *a*) предусматривает на валке валочно-трелевочную машину, на обрезке сучьев – сучкорезно-раскряжевочную машину, для получения пиломатериалов – круглопильный станок КАНТ-2М, ленточнопильный станок Тайга-2Б и агрегат для переработки тонкомера УПФП-1М; вариант (рис. 1, *б*) имеет на валке – харвестер (Harvester), на трелевке – форвардер (Forwarder), для получения пиломатериалов – круглопильный станок КАНТ-2М и агрегат для переработки тонкомера УПФП-1М.

Предлагаемые мобильные установки для продольной распиловки работают непосредственно на лесосеке, их привод осуществляется от двигателей внутреннего сгорания или от вала отбора мощностей трактора через карданный вал [15]. При этом конкретный состав и количество оборудования зависят от объема лесозаготовок и номенклатуры вырабатываемой продукции.

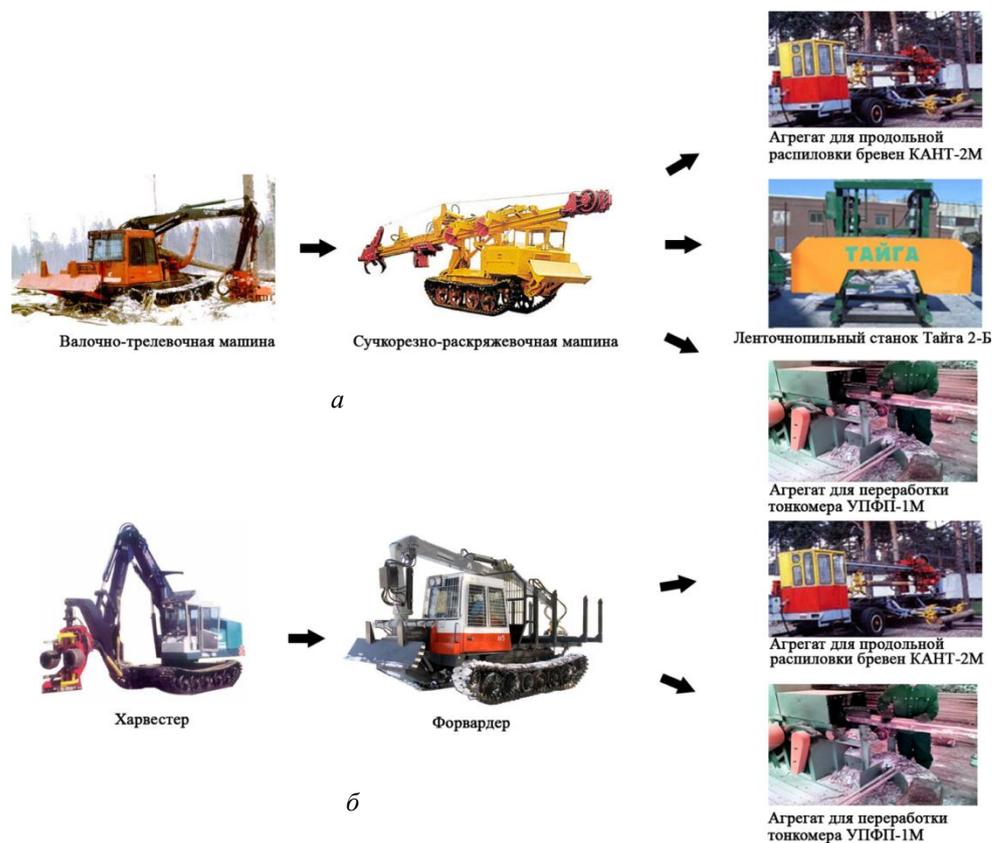


Рис. 1. Возможные варианты (*a*, *б*) комплектов машин для получения пиломатериалов на лесосеке

Fig. 1. Possible options (*a*, *б*) of machine sets for receiving sawn timber in the cutting area

В качестве силовой базы для привода рабочих механизмов оборудования УПФП-1М используется колесный трактор МТЗ-82, для агрегата КАНТ-2М – электрическая станция ЭСД-75 с дизель-электрическим агрегатом АД75-Т/400 на двухосном прицепе типа МА3-5207В [16].

Результаты исследования и их обсуждение

Особенность лесосечных работ заключается в последовательно-параллельном выполнении операций. Между всеми операциями создаются, потребляются, пополняются и вырабатываются оперативные запасы деревьев, хлыстов, сортиментов и др. Согласованная работа машин в комплекте может быть достигнута при условии поддержания этих запасов на определенном для конкретных условий уровне за счет увеличения численности и/или сменности работы машин на отстающих операциях. Это позволит: увеличить объем выработки комплекта машин до величины, равной объему выработки ведущей машины; уменьшить число дней работы машин, необходимое для заготовки заданного объема древесины; снизить негативное воздействие машин на лесные экосистемы [4].

Для оценки согласованности работы лесосечных машин и деревообрабатывающего оборудования нормы их выработки (табл. 1) определяли по [19].

Таблица 1

Нормы выработки оборудования в зависимости от среднего объема хлыста

Комплект машин	Средний объем хлыста $q_{хл}$, м ³	Сменная норма выработки единицы техники, м ³						
		ВТМ*	СРМ**	Harvester	Forwarder	УПФП-1М	КАНТ-2М	Тайга-2Б
<i>a</i>	0,27	36,00	42,00	–	–	14,00	14,00	10,00
<i>б</i>	0,17	–	–	48,90	62,00	10,65	44,89	–
	0,25	–	–	72,00	67,30	17,64	46,77	–
	0,30	–	–	86,00	71,30	17,75	56,13	–

*Валочно-трелевочная машина. **Сучкорезно-раскряжевочная машина.

Согласование работы машин и оборудования для рассматриваемого комплекта возможно за счет увеличения числа смен их работы на отстающих операциях. При среднем объеме хлыста $q_{хл} = 0,27$ м³ для схемы *a* (рис. 1) требуется повысить число смен работы ВТМ, агрегата КАНТ-2М, ленточнопильного станка Тайга-2Б и агрегата УПФП-1М. При остальных значениях $q_{хл}$ необходимо увеличить число смен работы многоцелевых машин харвестера и форвардера, а также агрегатов КАНТ-2М для продольной распиловки бревен и УПФП-1М для переработки тонкомера, но с соблюдением условия, что численность и/или сменность работы ведущей машины в комплекте остается постоянной.

Тогда для различных объемов хлыста объемы выработки оборудования на отдельных операциях с учетом роста числа смен на отстающих операциях будут иметь значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Объем выработки машин и оборудования при среднем объеме хлыста

$q_{хл}$, м ³	Операция	Марка оборудования	Объем выработки машин и оборудования, м ³			
			дополни- тельный Q_{di}	основ- ной Q_i	суммар- ный $Q_i^{(d)}$	макси- мальный Q_{max}
0,17	Валка	Harvester	14,67	48,90	63,57	62,00
	Трелевка	Forwarder				
	Трелевка	Forwarder	8,98	44,89	53,87	50,00
	Продольная распиловка	КАНТ-2М				
	Трелевка	Forwarder	2,13	10,65	12,78	12,00
	Переработка тонкомера	УПФП-1М				
0,25	Валка	Harvester	13,46	67,30	80,76	72,00
	Трелевка	Forwarder				
	Трелевка	Forwarder	9,35	46,77	56,12	51,00
	Продольная распиловка	КАНТ-2М				
	Трелевка	Forwarder	3,53	17,64	21,17	21,00
	Переработка тонкомера	УПФП-1М				
0,27	Валка	ВТМ	7,20	36,00	43,20	42,00
	Обрезка сучьев – раскряжевка	СРМ	2,78	23,90	26,60	25,20
	Продольная распиловка	КАНТ-2М, Тайга-2Б				
	Переработка тонкомера	УПФП-1М	4,20	14,00	18,20	16,80
0,30	Валка	Harvester	21,39	71,30	92,69	86,00
	Трелевка	Forwarder				
	Трелевка	Forwarder	11,22	56,13	67,35	65,00
	Продольная распиловка	КАНТ-2М				
	Трелевка	Forwarder	3,55	17,75	21,30	21,00
	Переработка тонкомера	УПФП-1М				

Согласно разработанной нами методике [4], вначале определим объем запасов, продолжительность их создания (t_1), пополнения и потребления (t_2), продолжительность дополнительного времени работы машин и оборудования на отстающих операциях (t_3) за расчетный период – месяц (T_n). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов режимов работы оборудования

Операция	Марка оборудо- вания	Количество оборудо- вания / смен, шт.	Объем запасов, м ³		Число дней работы			
			страхо- вых	гарантий- ных	t_1	t_2	t_3	T_n
Валка	Harvester	1 / 1	180,00	202,24	4,13	1,69	16,26	20,00
Трелевка	Forwarder	1 / 1						
Трелевка	Forwarder	1 / 1						
Продольная распиловка	КАНТ-2М	1 / 1	44,89	77,86	0,89	6,45	8,52	15,86
Трелевка	Forwarder	1 / 1	10,65	18,06	0,90	5,49	9,56	18,88
Переработка тонкомера	УПФП-1М	1 / 1						

Окончание табл. 3

Операция	Марка оборудования	Количество оборудования / смен, шт.	Объем запасов, м ³		Число дней работы			
			страховых	гарантийных	t_1	t_2	t_3	T_{Π}
Валка	Harvester	1 / 1	180,00	233,53	2,67	11,28	6,10	20,00
Трелевка	Forwarder	1 / 1						
Трелевка	Forwarder	1 / 1						
Продольная распиловка	КАНТ-2М	1 / 1	46,77	84,75	0,92	8,98	7,42	17,32
Трелевка	Forwarder	1 / 1	17,64	20,28	0,84	0,78	15,71	17,33
Переработка тонкомера	УПФП-1М	1 / 1						
Валка-трелевка	ВТМ	1 / 1	42,00	60,30	1,60	3,10	15,30	20,00
Обрезка сучьев - раскряжевка	СРМ	1 / 1						
Обрезка сучьев-раскряжевка	СРМ	1 / 1	23,90	35,93	0,95	9,25	8,12	18,32
Продольная распиловка	КАНТ-2М, Тайга-2Б	1 / 1						
Обрезка сучьев-раскряжевка	СРМ	1 / 1	14,20	29,35	1,75	5,80	10,80	18,35
Переработка тонкомера	УПФП-1М	1 / 1						
Валка	Harvester	1 / 1	180,00	262,33	2,50	5,60	12,30	20,40
Трелевка	Forwarder	1 / 1						
Трелевка	Forwarder	1 / 1						
Продольная распиловка	КАНТ-2М	1 / 1	56,13	87,00	0,86	3,48	13,14	17,48
Трелевка	Forwarder	1 / 1	17,75	22,32	0,85	1,40	15,23	17,48
Переработка тонкомера	УПФП-1М	1 / 1						

Число дней, на которое сокращается время разработки лесосеки в зависимости от среднего объема хлыста и объема производства, также найдем по методике [4] (табл. 4).

Таблица 4

Число дней, на которое сокращается время заготовки пиломатериалов, в зависимости от среднего объема хлыста на лесосеке и объема производства

Объем производства, тыс. м ³	Число дней при объеме хлыста $q_{хл}$, м ³			
	0,17	0,25	0,27	0,30
4	17,27	6,50	15,87	9,59
6	25,93	10,00	24,00	14,39
8	34,57	13,10	31,74	19,18
10	43,21	16,40	39,68	23,97
12	51,84	14,60	47,62	28,80

Рассчитав число дней, на которое сокращается время разработки лесосеки, по методике [5] определим снижение вредных выбросов по оксиду углерода (СО) для различных объемов хлыста и объемов производства (табл. 5).

Таблица 5

Снижение объема вредных выбросов по СО вследствие сокращения числа дней разработки лесосеки

$q_{хлр}$ м ³	Марка оборудования	Количество вредных выбросов по СО для объема производства, тыс. м ³				
		4	6	8	10	12
0,17	Harvester	218,32	327,81	437,03	546,26	655,36
	Forwarder	137,09	205,83	274,42	343,00	411,51
	КАНТ-2М	161,80	242,93	323,88	404,83	485,68
	УПФП-1М	99,52	149,42	199,21	248,99	298,72
$\sum V_{BS}$		616,73	925,99	1234,54	1543,08	1851,27
0,25	Harvester	82,17	126,42	165,61	207,33	247,78
	Forwarder	51,60	79,38	103,99	130,18	155,58
	КАНТ-2М	60,90	93,69	122,73	153,65	183,63
	УПФП-1М	37,46	57,62	75,49	94,50	112,94
$\sum V_{BS}$		232,12	357,11	467,82	585,66	699,94
0,27	ВТМ	114,47	178,16	228,93	286,20	343,47
	СРМ	91,45	142,33	182,90	228,65	274,41
	КАНТ-2М	101,09	157,34	202,18	252,76	303,72
	Тайга-2Б	148,68	231,41	297,37	371,75	446,14
	УПФП-1М	91,45	142,33	182,90	228,65	274,41
$\sum V_{BS}$		547,14	851,57	1094,28	1368,02	1642,15
0,30	Harvester	121,24	181,92	242,44	303,03	364,09
	Forwarder	76,13	114,23	152,23	190,27	228,61
	КАНТ-2М	89,85	134,82	179,67	224,57	269,82
	УПФП-1М	55,26	82,92	110,51	138,12	165,96
$\sum V_{BS}$		342,48	513,54	684,85	855,99	1028,48

Примечание. $\sum V_{BS}$ – суммарное значение снижения объема вредных выбросов основными машинами по СО.

В связи с тем, что повышение объема выработки комплекта машин и оборудования достигается за счет увеличения числа смен их работы на отстающих операциях (табл. 6), вычислим количество вредных выбросов за дополнительно отработанное время с учетом объема хлыста и годового объема производства (табл. 7).

Таблица 6

Изменение числа дней работы дополнительного оборудования на отстающих операциях в зависимости от среднего объема хлыста на лесосеке и годового объема производства

$q_{хлр}$ м ³	Марка оборудования	Число дней работы дополнительного оборудования для объема производства, тыс. м ³				
		4	6	8	10	12
0,17	Harvester	15,75	23,61	31,46	9,50	47,17
	КАНТ-2М	5,50	8,25	10,99	68,40	16,48
	УПФП-1М	6,14	9,196	12,25	39,31	18,37

Окончание табл. 6

$q_{хл},$ м ³	Марка оборудования	Число дней работы дополнительного оборудования для объема производства, тыс. м ³				
		4	6	8	10	12
0,25	Forwarder	3,60	5,44	7,25	9,06	10,88
	КАНТ-2М	4,41	6,62	8,82	11,03	13,24
	УПФП-1М	9,33	14,01	18,66	23,34	28,02
0,27	ЛП-17	14,52	21,65	29,00	36,30	43,55
	КАНТ-2М, Тайга-2Б	7,73	11,53	15,46	19,32	23,19
	УПФП-1М	15,45	23,10	30,90	38,63	46,35
0,30	Forwarder	10,38	15,55	20,72	25,89	31,06
	КАНТ-2М	7,38	11,06	14,74	18,42	22,10
	УПФП-1М	8,56	12,82	17,08	21,35	25,62

Таблица 7

**Объем вредных выбросов по СО от дополнительно подключаемых машин
в зависимости от среднего объема хлыста на лесосеке
и годового объема производства**

$q_{хл},$ м ³	Марка оборудования	Количество вредных выбросов по СО, кг, от дополнительных машин для объема производства, тыс. м ³				
		4	6	8	10	12
0,17	Harvester	19,91	298,48	397,72	496,96	596,32
	КАНТ-2М	44,47	77,29	88,85	111,00	133,24
	УПФП-1М	35,38	52,99	70,59	88,22	105,86
$\sum V_{BS}^{(д)}$		278,96	428,76	557,16	696,19	835,42
0,25	Forwarder	28,58	43,18	57,55	71,92	86,37
	КАНТ-2М	41,32	62,02	82,63	103,34	124,04
	УПФП-1М	53,76	80,73	107,53	134,49	161,46
$\sum V_{BS}^{(д)}$		123,66	185,94	247,71	309,75	371,87
0,27	ЛП-17	104,73	156,19	209,17	261,83	314,12
	КАНТ-2М, Тайга-2Б	49,24	73,45	98,48	123,07	147,72
	УПФП-1М	89,03	133,11	178,06	222,60	267,09
$\sum V_{BS}^{(д)}$		243,00	851,57	485,71	607,50	728,93
0,30	Forwarder	82,40	123,44	164,48	205,51	246,55
	КАНТ-2М	69,14	103,62	138,10	172,57	207,05
	УПФП-1М	49,33	73,87	98,42	123,03	147,63
$\sum V_{BS}^{(д)}$		200,86	300,93	400,99	501,12	601,24

Примечание. $\sum V_{BS}^{(д)}$ – суммарное значение объема вредных выбросов от дополнительных машин по СО.

После расчета снижения вредных выбросов по СО и нахождения выбросов от дополнительно подключаемых машин определим абсолютное уменьшение этого показателя как разницу между ними. Полученные результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8

**Абсолютное снижение объема вредных выбросов по СО
с учетом работы дополнительных машин**

$q_{хл},$ м ³	Количество вредных выбросов по СО, кг, для объема производства, тыс. м ³				
	4 000	6	8	10	12
0,17	337,70	497,20	677,30	846,80	1 015,80

Окончание табл. 8

$q_{\text{хл}}, \text{м}^3$	Количество вредных выбросов по CO, кг, для объема производства, тыс. м^3				
	4 000	6	8	10	12
0,25	15,60	21,90	29,40	37,00	45,90
0,27	304,10	488,80	608,50	760,50	913,20
0,30	141,60	213,00	283,80	354,80	427,20

Зная количество дней ($D_{\text{эв}}$), на которое сокращается время разработки лесосеки (экономленное время) в зависимости от среднего объема хлыста и запаса древесины на лесосеке, рассчитаем площадь лесных почв (S_c), сохраненных от разрушения:

$$S_c = \frac{Q_{\text{max}} D_{\text{эв}}}{g_{\text{ср}}} K_{\text{эв}},$$

где Q_{max} – максимальный объем выработки комплекта машин и оборудования, м^3 ; $g_{\text{ср}}$ – средний запас древесины, $\text{м}^3/\text{га}$; $K_{\text{эв}}$ – коэффициент использования экономленного времени.

В связи с тем, что выбрать значение $K_{\text{эв}}$ очень сложно, принимаем его в диапазоне от 0,1 до 1,0, тогда для среднего объема хлыста 0,27 м^3 и годового объема производства 6 тыс. м^3 площадь лесных почв, сохраненных от разрушения, $S_c = 0,613...6,130$ га.

Для остальных значений среднего объема хлыста и годового объема производства результаты расчетов приведены в табл. 9.

Таблица 9

Изменение площадей лесных почв, сохраненных от разрушения, в зависимости от годового объема производства и среднего объема хлыста на лесосеке (min...max)

$q_{\text{хл}}, \text{м}^3$	Площадь лесных почв, сохраненных от разрушения, га, для объема производства, тыс. м^3				
	4	6	8	10	12
0,17	0,590...5,900	0,893...8,931	1,191...11,910	1,488...14,880	1,000...17,800
0,25	0,156...1,560	0,233...2,330	0,310...3,100	0,388...3,880	0,468...4,680
0,27	0,405...4,050	0,613...6,130	0,811...8,110	1,014...10,140	1,200...12,000
0,30	0,460...4,600	0,687...6,870	0,916...9,160	1,145...11,450	1,400...14,000

Анализ данных табл. 9 показывает, что площадь лесных почв, сохраненных от разрушения, может достигать значительных размеров, в среднем от 1 до 10 га.

При разработке лесосек в летних условиях возможна компенсация простоев машин из-за затянувшихся дождей, которая обеспечит соответствующее увеличение объемов выработки машин на отдельных операциях комплектов техники. Такая организация работы позволит эксплуатировать лесозаготовительные машины в более сухой период времени, что значительно снизит вредное воздействие их на почвенный покров и износ лесозаготовительной техники.

На основании полученных данных построены графики зависимости числа рабочих дней, на которое сокращается время заготовки сортиментов (рис. 2), и абсолютного снижения количества вредных выбросов по CO от объема производства (рис. 3) при различных значениях среднего объема хлыста.

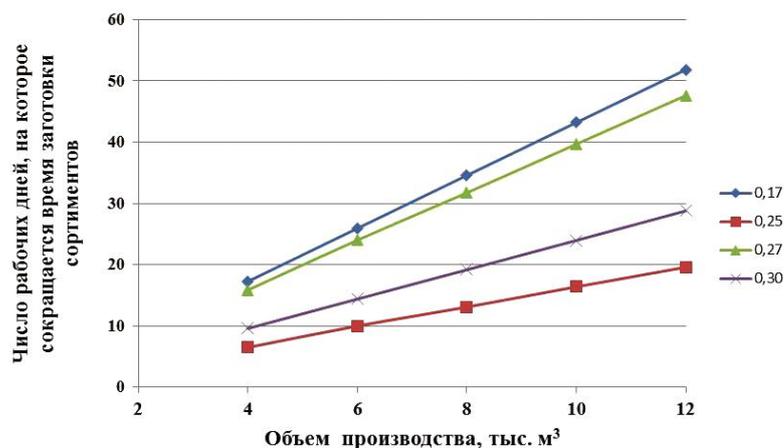


Рис. 2. Зависимость сокращения времени заготовки сортиментов от объема производства при различных значениях среднего объема хлыста

Fig. 2. The dependence of the number of working days, to which the time for shortwood logging is reduced, on the volume of production at various values of average stem volume

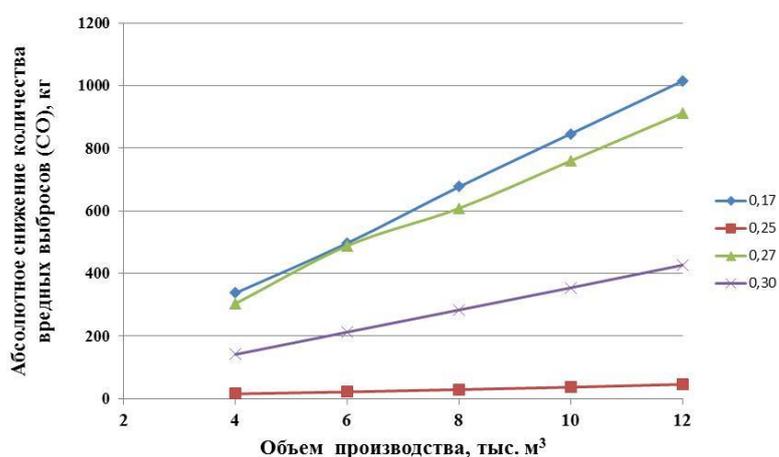


Рис. 3. Зависимость абсолютного снижения количества вредных выбросов по CO от годового объема производства при различных значениях среднего объема хлыста

Fig. 3. The dependence of the absolute reduction of hazardous emissions by CO on the annual production for various values of average stem volume

Заключение

Известно, что радиоактивно загрязненные леса представляют серьезную экологическую опасность, так как возможен перенос радионуклидов на незагрязненные территории вследствие возникновения пожаров по природным и техногенным причинам. В результате проведенных исследований установлено, что заготовка и использование древесины из этих регионов на основе мо-

бильных комплексов машин и оборудования, работающих непосредственно на лесосеке, с приводом от двигателей внутреннего сгорания или самоходных машин является весьма актуальной задачей. Возникающая при этом необходимость минимизировать продолжительность работы машин и оборудования может быть достигнута за счет согласованной работы лесосечных машин с мобильным оборудованием по объему перерабатываемой древесины на каждой операции. Согласование объемов выработки машин и оборудования возможно за счет создания и поддержания (потребления, пополнения и выработки) на определенном для конкретных условий уровне оперативных запасов. Для этого с учетом разработанных ранее моделей, предусматривающих увеличение численности и/или сменности работы машин и оборудования на отстающих операциях, определяются режимы функционирования комплекта машин в целом. Данный подход к решению проблемы позволит: обеспечить объем выработки комплекта машин и оборудования, равный объему выработки ведущего оборудования комплекта; сократить необходимое количество дней для заготовки заданного объема пиломатериалов (как показывают расчеты, от 6 до 17 дн. при объеме выполненных работ 4 тыс. м³, от 15 до 52 дн. – при 12 тыс. м³); сократить количество загрязняющих веществ, которые двигатели самоходных машин выбрасывают в атмосферу в количестве от 15 до 1015 кг в зависимости от объема выполненных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вместо бревен везут из леса доски // Лесн. газета. 1992. 15 окт. С. 2. [Instead of Logs, Boards are Brought from the Forest. *Lesnaya gazeta*, 1992, p. 2].
2. Гомонай М.В., Никушов В.Д. Передвижная система машин для комплексной переработки древесины // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2006. № 6. С. 87–92. [Gomonay M.V., Nikishov V.D. The Mobile System of the Machines for Complex Conversion Wood. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2006, no. 6, pp. 87–92].
3. Душа-Гудым С.И. Лесные пожары на загрязненных радионуклидами территориях // Охрана и защита леса, механизация, использование леса: обзор. информ. 1993. Т. 9. С. 1–50. [Dusha-Gudym S.I. Forest Fires on Radionuclide Contaminated Territories. *Guarding and Protection of Forest, Mechanization, Using of Forest: Obzornaya informatsiya*, 1993, vol. 9, pp. 1–50].
4. Заикин А.Н. Моделирование режимов работы лесосечных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 1. С. 71–77. [Zaikin A.N. Simulation of Logging Machines Operation Modes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 1, pp. 71–77]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/27d/27d123e35cbb74f7f17b1974f6f195da.pdf>
5. Заикин А.Н. Моделирование процессов лесозаготовок как основа снижения негативного воздействия лесосечных машин на лесные экосистемы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 72–77. [Zaikin A.N. Simulation of Logging Processes as Basis of Lowering Negative Impact of Forest Machines on Forest Ecosystems. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 2, pp. 72–77]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/244/244de442e67d07dd7665ef8af5c5d311.pdf>
6. Заикин А.Н., Меркелов В.М. Технология и оборудование заготовки и переработки древесины, загрязненной радионуклидами: моногр. Брянск: БГИТА, 2012. 266 с. [Zaikin A.N., Merkelov V.M. *Technology and Equipment for Harvesting and Processing of Timber, Contaminated with Radionuclides*. Bryansk, BGITA Publ., 2012. 266 p.].
7. Заикин А.Н., Меркелов В.М. Технология использования древесины с территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: сб. докл. IV Междунар. науч. экол. конф., Краснодар, 24–25 марта 2015 г. Краснодар: Кубан. госагроун-т, 2015. Ч. II. С. 573–575. [Zaikin A.N., Merkelov V.M. Technology Use Wood from the Ter-

ritories Affected by Radioactive Contamination. *Issues of Waste Reclamation of Household, Industrial and Agricultural Production: Collection of Reports of the 4th International Scientific Environmental Conference, Krasnodar, March 24–25, 2015*. Krasnodar, KubSAU Publ., 2015, part 2, pp. 573–575].

8. Климов О.Г., Дороничева Е.Г. О концентрации в воздухе загрязняющих веществ, выбрасываемых лесопромышленной техникой // Лесн. хоз-во. 2003. № 4. С. 48. [Klimov O.G., Doronicheva E.G. On the Air Concentration of Pollutants Emitted Forestry Equipment. *Lesnoye khozyaystvo*, 2003, no. 4, p. 48].

9. Климусhev Н.К. Автоматизация выбора систем машин для сортиментной заготовки древесины // Рациональное использование лесных ресурсов: материалы междуна- р. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В.Е. Печенкина, 24–25 янв. 2001 г. / [Ю.А. Ширнин (отв. ред.)]. Йошкар Ола: МарГТУ, 2001. С. 54–55. [Klimushev N.K. Automation of Selection of Machine Systems for CTL Logging of Wood. *Proceedings of International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of V.E. Pechenkin*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2001, pp. 54–55].

10. Климусhev Н.К. Методы и модели управления запасами лесоматериалов: моногр. Ухта: Изд-во УГТУ, 2001. 76 с. [Klimushev N.K. *Methods and Models of Timber Inventory Management*: Monograph. Ukhta, USTU Publ., 2001. 76 p.].

11. Климусhev Н.К. Методы расчета запасов лесоматериалов // Региональное использование лесных ресурсов: материалы междуна- р. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В.Е. Печенкина, 24–25 янв. 2001 г. / [Ю.А. Ширнин (отв. ред.)]. Йошкар Ола: МарГТУ, 2001. С. 190–192. [Klimushev N.K. Computation Methods of Timber Stocks. *Efficient Use of Forest Resources: Proceedings of International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of V.E. Pechenkin*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2001, pp. 190–192].

12. Климусhev Н.К. Оптимизация систем машин для сортиментной заготовки в условиях Республики Коми // Сб. науч. тр. УГТУ. Вып. 5. Ухта, 2002. С. 85–88. [Klimushev N.K. Optimization of Machine Systems for Assortment Logging in the Komi Republic. *Collection of Academic Papers of USTU*. Ukhta, 2002, iss. 5, pp. 85–88].

13. Котов А.С. Радиационная ситуация в лесах Брянской области // Безопасность окружающей среды. 2008. № 2. С. 68–72. [Kotov A.S. Radiation Situation in the Forests of Bryansk Region. *Bezopasnost' okruzhayushchey sredy*, 2008, no. 2, pp. 68–72].

14. Мащенко Т.В. Использование древесины в строительном комплексе в зависимости от условий произрастания на радиоактивно-загрязненных территориях. дис. ... канд. с.-х. наук. Брянск, 1999. 159 с. [Mashchenko T.V. *The Use of Wood in the Construction Sector Depending on the Conditions of Growth in Radioactive Contaminated Areas*: Cand. Agric. Sci. Diss. Bryansk, 1999. 159 p.].

15. Меркелов В.М., Макеева А.А. Мобильные установки для переработки древесины, загрязненной радионуклидами // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы II Междуна- р. науч.-техн. конф. Кострома: КГТУ, 2013. С. 132–134. [Merkelov V.M., Makeyeva A.A. Mobile Units for the Wood Processing, Contaminated with Radionuclides. *Current Issues and Prospects of the Timber Industry Development: Proceedings of the 2nd International Scientific and Engineering Conference*. Kostroma, KGTU Publ., 2013, pp. 132–134].

16. Обоснование ресурсосберегающих технологий лесопромышленного комплекса, адаптированных к природным условиям Пермского края, с минимизацией затрат на лесовосстановление: отчет о НИР (промежуточный) / МарГТУ; рук. Якимович С.Б. Гос. контракт № 01.29/07 с М-вом пром-сти и природ. ресурсов Пермского края. Йошкар-Ола, 2007. 500 с. [Justification of Resource-Saving Technologies of the Timber Industry, Adapted to the Natural Conditions of Perm Krai, with Cost Minimization for Reforestation: Interim Research Report. Directed by Yakimovich S.B. *State Contract with the Ministry of Industry and Natural Resources of the Perm Krai No. 01.29/07*. Yoshkar-Ola, 2007. 500 p.].

17. Торопов А.С., Заикин А.Н., Меркелов В.М. Особенности переработки древесины, загрязненной радионуклидами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 1. С. 119–128. [Tоропов A.S., Zaikin A.N., Merkulov V.M. Peculiarities of Processing of Wood Polluted

by Radioactive Nuclides. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 119–128]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.1.119](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.119); URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/fc9/toropov.pdf>

18. Торопов А.С., Меркелов В.М., Краснова В.Ф. Принципы моделирования раскря древесины, загрязненной радионуклидами // Вестн. КрасГАУ. 2011. № 5. С. 7–11. [Toropov A.S., Merkelov V.M., Krasnova V.F. Modeling Principles for Cutting the Wood, Polluted by the Radionuclides. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2011, no. 5, pp. 7–11].

19. Цыгарова М.В., Суетина Р.И. Нормативно-справочные материалы к технико-экономическим расчетам: метод. указания. Ухта: УГТУ, 2008. 51 с. [Tsygarova M.V. *Reference Materials for Technical and Economic Assessment*. Ukhta, USTU Publ., 2008. 51 p.].

20. Якимович С.Б. Постановка задачи оптимального управления синтеза для совокупности технологических процессов лесозаготовок // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2005. № 6. С. 86–89. [Yakimovich S.B. Statement of the Problem of Optimum and Governing a Syntheses for Aggregates of Technological Processes of Logging. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2005, no. 6, pp. 86–89].

21. Якимович С.Б., Володина И.Ю. Формирование комплектов машин лесозаготовок на основе распределения состояний предмета труда по маршруту технологического процесса // Лесн. вестн. 2001. № 2. С. 128–136. [Yakimovich S.B., Volodin I.Yu. Formation of Sets of Logging Machine Based on the State Distribution of the Subject of Labor along the Technological Process Route. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2001, no. 2, pp. 128–136].

22. Якимович С.Б., Ефимов Ю.В. Возможности снижения удельной энергоемкости при производстве пиломатериалов на лесосеке // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2009. Вып. 22. С. 227–228. [Yakimovich S.B., Efimov Yu.V. Possibilities for reducing the energy density in the production of sawn timber in the cutting area. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*. 2009, iss. 22, pp. 227–228].

23. Calabrese M., Quarantotto M., Cantaluppi C., Fasson A., Bogoni P. Quality Characteristics and Radioactive Contamination of Wood Pellet Imported in Italy. *Open Journal of Applied Sciences*, 2015, vol. 5, no. 5, pp. 183–190. DOI: [10.4236/ojapps.2015.55018](https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.55018)

24. Hus M., Košutić K., Lulić S. Radioactive Contamination of Wood and Its Products. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2001, vol. 55, iss. 2, pp. 179–186. DOI: [10.1016/S0265-931X\(00\)00191-0](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00191-0)

25. McCabe L.C. Wood-Burning Incinerators ATMOSPHERIC POLLUTION. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952, vol. 44(4), pp. 111A–114A. DOI: [10.1021/ie50508a008](https://doi.org/10.1021/ie50508a008)

26. Panfilov A.V., Uspenskaya E.Ju. Rehabilitation of Radioactive Contaminated Forests. *Radiation Legacy of the 20th Century: Environmental Restoration*. Vienna, IAEA, 2002, pp. 329–336.

27. Smith C.B., Amiro B.D., Lewis G., MacAulay Ed., Stauber D. Environmental Assessment of Radiological Consequences for Forestry in Contaminated Areas of the Republic of Belarus. Final Report: Fire Management Mission. Vol. 5. *Report No. E41. Belarus – Forestry Sector Development Project*. Denmark, AECL, 1993. 23 p. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/571081468206692053/Final-report-fire-management-mission> (accessed 06.02.19).

28. Szekely J.G., Amiro B.D., Rasmussen L.R., Ford B. Environmental Assessment of Radiological Consequences for Forestry in Contaminated Areas of the Republic of Belarus. Report. Vol. 1. *Report No. E41. Belarus – Forestry Sector Development Project*. Denmark, AECL, 1994. 57 p. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/955151468205155942/Report> (accessed 06.02.19).

29. Zaikin A.N., Mukovnina M.V., Nikitin V.V. Scherbakov E.N. Reducing Industrial Impact on Forest Ecosystems by Improving the Organization of Harvesting Operations. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2018, vol. 11, no. 60, pp. 69–76.

OPERATING EFFICIENCY IMPROVEMENT OF MACHINERY AND EQUIPMENT WHILE LOGGING IN FORESTS WITH RADIOACTIVE CONTAMINATION

A.N. Zaikin¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-1831-6893](https://orcid.org/0000-0002-1831-6893)

A.S. Toropov², Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: [0000-0003-4414-2505](https://orcid.org/0000-0003-4414-2505)

B.M. Merkelov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.

V.V. Sivakov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/R-7264-2019),

ORCID: [0000-0002-0175-9030](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030)

¹Bryansk State Engineering Technological University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: Zaikin.Anatolij@yandex.ru, merkelov55@mail.ru, svv000@yandex.ru

²Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation; e-mail: ToropovAS@mail.ru

Due to technogenic accidents at nuclear power plants, including the Chernobyl Nuclear Power Plant, part of the forests of the Russian Federation was exposed to radioactive contamination. As a result, it established the conditions under which multipurpose use of forests and forest resources is impossible over the long run. These forests pose a serious environmental hazard due to the possibility of transfer of radioactive contamination to clean areas, because of the occurrence of antropogenic and natural fires. Logging and use of wood from such regions is an urgent issue, which provides environmental problem solving by reducing the possibility of recontamination with radionuclides of surroundings. One of the solutions within the given scenario is our proposed technology for the integrated processing of wood contaminated with radionuclides based on internally powered mobile packages of machinery and equipment operating directly on the cutting area or self-propelled vehicles in order to produce clear timber. Herewith, the arisen need to minimize the operating time of machines and equipment is capable of being achieved through the coordinated functioning of cutting machines with mobile equipment in terms of the volume of processed wood at each stage. Coordination of the production volumes of machines and equipment is possible through the creation and maintenance (consumption, replenishment and production) at a specific level of day-on-hand stocks for particular conditions. The operating modes of a set of machines as a whole are determined taking into account previously developed models, providing for an increase in the number and/or shift of machines and equipment functioning in logging operations. This problem solving approach will allow: to ensure the volume of production of a set of machines and equipment equal to the production volume of the leading equipment of the set; reduce the number of days required to harvest a given amount of wood; reduce the amount of pollutants (for example, carbon monoxide) that self-propelled engines emit into the atmosphere.

For citation: Zaikin A.N., Toropov A.S., Merkelov B.M., Sivakov V.V. Operating Efficiency Improvement of Machinery and Equipment while Logging in Forests with Radioactive Contamination. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 113–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-113-127

Keywords: radionuclides, contamination, longitudinal cutting, recycling, cutting area, set of machines, stem, sawn timber.

Поступила 06.02.19 / Received on February 6, 2019

УДК 630.323.13

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-128-145

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ЛЕСООЧИСТКИ ЛОЖ ВОДОХРАНИЛИЩ И КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ

С.Н. Орловский, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-6780-2019](#),

ORCID: [0000-0001-8904-834X](#)

Красноярский государственный аграрный университет, просп. Мира, д. 90, г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

Проблема очистки лож водохранилищ при строительстве каскадов гидроэлектростанций актуальна. В существующей практике свodka леса осуществляется в виде сплошных рубок главного пользования, выполняемых за 15–20 лет до затопления территории. При этом не учитывается, что еще до затопления происходит вторичное зарастание ложа водохранилища тонкомерными листовыми породами с диаметрами стволов до 15 см, средний объем хлыста которых в 3–5 раз меньше, чем у предшествующих лесозаготовительных рубок. В связи с этим на данном виде работ применение существующей лесозаготовительной техники малоэффективно. Необходимы машины и технологии, обеспечивающие выполнение поставленной задачи. Цель исследования – разработка технологии очистки ложа водохранилища (на примере Богучанской гидроэлектростанции на р. Ангара) от вторичного зарастания после проведения сплошных рубок, а также конструкции и компоновки оборудования к валочно-пакетирующей машине ЛП-19В для срезания деревьев, технологии его применения. Программа исследований предусматривает: анализ усилий резания древесины с учетом сил инерции; расчеты производительности агрегата срезания древостоев и их транспортировки к месту погрузки; выбор размеров пасек, их числа и расстояний трелевки или вывозки; изучение режимов использования техники на срезании пней, лесосводке и вывозке. Предложена конструкция рабочего органа к ЛП-19В, включающая дисковую фрезу и откладчик пачек, что позволяет повысить ее производительность в лесосеках в 3–4 раза при объеме хлыста около 0,14 м³. Разработана технология погрузки и доставки леса на баржи, переработки неделовой древесины. Предлагаемая технология повторной очистки ложа водохранилища гидроэлектростанций позволяет полностью механизировать технологический процесс лесозаготовки, снизить затраты труда и повысить ее качество, уменьшить негативные процессы, связанные с затоплением древесных насаждений при заполнении водохранилищ гидроэлектростанций.

Для цитирования: Орловский С.Н. Обоснование технологии механизированной лесозаготовки лож водохранилищ и компоновки оборудования для ее выполнения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 128–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-128-145

Ключевые слова: водохранилище, свodka леса, технология лесозаготовки водохранилища, механизация, срезание древостоев, компоновка, конструкция.

Введение

В Красноярском крае с 50-х гг. XX в. планировалось строительство каскада гидроэлектростанций на р. Ангара. Были построены Иркутская, Братская и Усть-Илимская ГЭС, начато строительство Богучанской ГЭС. Для исключения нарушений, возникающих при затоплении древесной растительности в процессе заполнения водохранилищ гидроэлектростанций, необходимо очищать их ложе от древесной растительности.

Для Богучанской ГЭС была выбрана схема сводки леса посредством проведения сплошных рубок по всей затопляемой площади. Однако после завершения рубок произошло вторичное зарастание ложа водохранилища. На территориях, намеченных к проведению повторной лесоочистки, сосредоточены насаждения тонкомерных лиственных пород (береза, осина) с диаметрами стволов до 15 см. Для древостоев III бонитета средний объем хлыста составляет $0,14 \text{ м}^3$, запас леса – $176 \text{ м}^3/\text{га}$ при числе стволов 1257 шт./га [2, 6–8].

В данном случае наиболее эффективно получение готовой продукции (стволов в виде сортиментов и топливной чурки или щепы) непосредственно на месте проведения повторной лесоочистки. Доставка готовой продукции потребителям должна осуществляться водным путем.

Основные технологические операции при проведении повторной лесоочистки ложа водохранилища Богучанской ГЭС: доставка машин и механизмов к месту проведения работ; валка стоящих деревьев; сбор и доставка древесины к месту раскряжевки; раскряжевка стволов на сортименты; рубка вершин и сучьев на топливную чурку; доставка сортиментов и топливной чурки или щепы.

Дорожная сеть на осваиваемой территории практически отсутствует. Существуют технологии лесосводки с валкой леса, погрузкой его на баржи и доставкой водным путем в пункт назначения, при которых дорожная сеть не требуется. На подлежащей освоению территории прокладываются только волоки, освоение производится продвижением техники по территории одновременно с подъемом уровня воды [8, 16, 17].

Направления исследования – изучение технологических схем для наиболее эффективной разработки лесосеки вблизи береговой черты затопляемого водохранилища, подбор необходимых для этого технических средств и расчет их производительности; подбор оборудования, позволяющего использовать исключаящую ручной труд лесозаготовительную технику, созданную для работы в крупномерных насаждениях, в древостоях III класса бонитета с диаметрами стволов до 15 см и средним объемом хлыста $0,14 \text{ м}^3$ при числе стволов около 1200 шт./га; разработка методики расчета затрат мощности на срезание древесины дисковой фрезой в режиме непрерывного движения рабочего органа по ширине пасаки.

Актуальность данной работы заключается в снижении затрат энергии на выполнение лесосечных работ, трудоемкости технологического процесса и повышении производительности труда, а также исключении экологических нарушений при затоплении водохранилища. Новизна работы состоит в применении принципиально нового способа лесоочистки.

Объекты и методы исследования

Поиск материалов по теме исследования включал сбор данных об осваиваемой территории, о предполагаемых технологиях сводки леса, его транспортировке, первичной переработке, погрузке и доставке потребителям, о конструкции лесозаготовительных и других агрегатов, способах погрузки, вывозки леса, а также о технологиях лесозаготовок в маломерных лесонасаждениях. Рассматривались конструкции машин и агрегатов для высокопроизводительной лесоочистки от мелкого леса, используемые в других отраслях народного хозяйства, в частности в торфяной промышленности [1, 4, 8, 9, 15, 18–22].

Перед нами стояла задача – разработать эффективную высокопроизводительную технологию лесочистки и средства механизации для ее выполнения, исключая ручной труд и обеспечивающие решение задачи с минимальными затратами энергии, времени и материальных средств.

Ручной способ лесочистки, включающий валку древесины и обрезку сучьев бензопилами, трелевку установленной на барже лебедкой и использование стационарной рубильной машины для измельчения древесины на технологическую и топливную щепу, не рассматривался ввиду его низкой производительности и высокой трудоемкости. При этом доставка щепы на баржах навалом может привести к ее потерям при уносе ветром над акваторией водохранилища [7, 8].

При механизированном способе лесочистки срезание древесной растительности производится валочно-пакетирующей машиной ЛП-19В [1, 21]. Сбор срезанной древесной растительности осуществляется погрузочно-транспортной машиной (форвардер) МЛПТ-354. Собранная древесина транспортируется к сучкорезной машине ЛП-30Б, устанавливаемой на барже. После обрезки сучьев древесина подается в мобильную рубильную машину ТТ 100 ТИ «Альстром», расположенную рядом с сучкорезной машиной. Полученная щепа из рубильной машины подается на баржу.

Достоинство данной технологической схемы – применение комплекта оборудования, апробированного на лесозаготовках в России. К ее недостаткам можно отнести несоответствие производительности базовой машины ЛП-19В ($200...250 \text{ м}^3/\text{см}$ в лесонасаждениях с объемом хлыста $0,40...0,80 \text{ м}^3$) ее производительности в насаждениях с объемом хлыста $0,14 \text{ м}^3$ [4, 21, 22]. При снижении объема хлыста время цикла повала деревьев и формирования пачек изменяется незначительно. Учитывая, что в рубках главного пользования средний объем хлыста в процессе работы валочно-пакетирующей машины составляет $0,60 \text{ м}^3$, а объем хлыста в проектом варианте – $0,14 \text{ м}^3$, сменная выработка машины увеличится в 4,3 раза, производительность – до $60 \text{ м}^3/\text{см}$.

Вывозка хлыстов с применением МЛПТ-354, которая осуществляет сбор срезанной древесины и ее доставку к сучкорезной машине, без подготовки волоков будет существенно затруднена из-за наличия пней.

По результатам расчетов предложены технологии разработки пазов и погрузки и доставки леса на баржи, переработки древесных отходов. В отличие от серийно выпускаемых машин ЛП-19В предлагаемая нами машина имеет штангу с установленным на ней дискофрезерным валочным устройством, а также захватное приспособление для формирования пакета срезанного леса – откладчик пачек [1, 4]. Срезание древостоев осуществляется дисковой фрезой при повороте надстройки машины, срезанные деревья собираются в пакет захватами и сбрасываются параллельно проходу машины. После поворота надстройка возвращается в первоначальное положение, и машина проезжает вперед на расстояние диаметра фрезы. Далее описанный цикл повторяется до конца пазы.

После срезки деревьев и укладки их в пачки по трассам движения форвардеров производится срезка пней, что позволяет осуществлять вывозку хлыстов с большими скоростями движения. Срезка пней выполняется машиной для удаления пней МУП-4, навешиваемой на трактор «Онежец» ТДТ-100, который также используется для вывозки хлыстов [1, 9, 18, 22]. Срезанные деревья грузятся манипулятором на грузовую платформу форвардера «Оне-

жец» ТБ-1 МА-16 и транспортируются к временному нижнему складу, где форвардер разгружается грейфером плавучего крана, стволы раскряжевываются, полученные сортименты грузятся на первую баржу, а вершины и тонкомер подаются в измельчающее устройство, которое режет их на чурочки и распределяет по второй барже. По мере загрузки барж буксир транспортирует их к месту разгрузки, а плавучий кран перебазирован на новую позицию.

Предлагаемая технология повторной очистки ложа водохранилища Богучанской ГЭС позволяет полностью механизировать технологический процесс лесосводки; снизить затраты труда и повысить качество очистки; уменьшить негативные явления, связанные с затоплением древесных насаждений при заполнении водохранилища.

Прототипом для разработки оборудования, обеспечивающего высокопроизводительную работу ЛП-19В в маломерных насаждениях, послужили применяемые в торфяной промышленности машина ЭТУ-0,75 и ее модификация МТП-43 [4] (рис. 1).



Рис. 1. Машина торфяной промышленности МТП-43

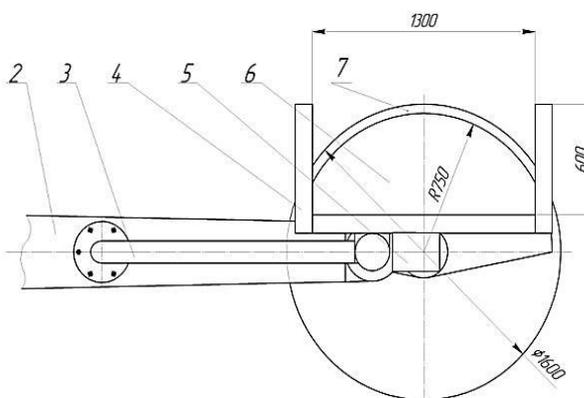
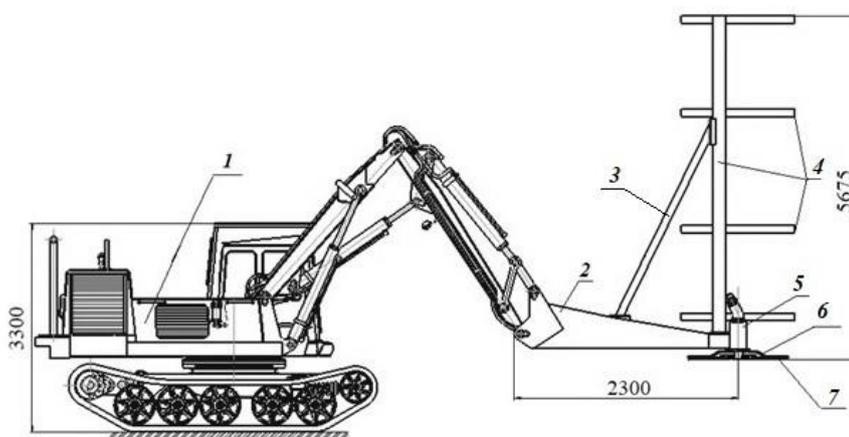
Fig. 1. Peat industry machine MTP-43

ЭТУ-0,75 представляет собой самоходную машину на гусеничном ходу. Включает: рабочий орган – дисковую фрезу диаметром 1500 мм и толщиной 20 мм с защитным диском, на который опирается срезанный ствол; откладчик пачек для удержания срезанного леса в вертикальном положении; механическую трансмиссию привода фрезы [4]. Лес диаметром до 25 см срезается на высоте 0,25 м от поверхности грунта в пределах угла поворота надстройки 180°. Откладчик поддерживает срезанные деревья в вертикальном положении в зоне рабочего хода фрезы при укладке их в пачки, параллельные рабочему ходу машины, при остановке надстройки. После очередного среза ЭТУ-0,75 продвигается вперед на 1,5 м, а описанный цикл повторяется. За один проход ЭТУ-0,75 прокладывает полосу шириной 18 м.

На основе ЭТУ-0,75 была разработана машина МТП-43, имеющая дизель-электрический привод фрезы от электродвигателя мощностью 30 кВт. Ширина освобождаемой от леса полосы – 25 м, производительность – 1,2 га за смену [4].

Разработанный нами агрегат предназначен для срезки маломерного леса в зоне затопления водохранилищ гидроэлектростанций. Оборудование включает смонтированный на рукояти ЛП-19В (вместо захвата и пильного устройства) удлинитель в виде коробчатой фермы с расположенным на ее конце гидравлическим двигателем, соединенным с фрезерным диском, над которым расположен защитный диск. Для сбора пачек над фрезой имеется откладчик пачек, выполненный из труб коробчатого сечения (рис. 2).

a



б

Рис. 2. Проектный агрегат для срезки маломерного леса на базе ЛП-19В: *a* – вид на агрегат сбоку; *б* – рабочий орган агрегата, вид сверху; 1 – базовая машина ЛП-19В; 2 – удлинитель рукояти; 3 – раскос; 4 – откладчик пачек; 5 – гидравлический двигатель 210.32; 6 – защитный диск; 7 – фреза

Fig. 2. Design unit for cutting small forests on the basis of feller-buncher LP-19V: *a* – side view of the unit; *б* – working body of the unit, top view; 1 – base machine LP-19V; 2 – handle extension; 3 – brace; 4 – packer; 5 – hydraulic engine 210.32; 6 – shielding wheel; 7 – cutter

Техническая характеристика ЛП-19В, модернизированного для сводки маломерного леса: диаметр фрезы – 1600 мм; скорость резания – 55...42 м/с;

число резцов дисковой фрезы – 64 шт.; частота вращения фрезерного диска – $11,0...8,5 \text{ с}^{-1}$; путь резания, равный длине дуги 180° , – 37,68 м; эксплуатационная производительность – 279 м^3 за смену; радиус поворота по внешней кромке фрезы – 12 м; время поворота агрегата при срезе – 19,8 с; скорость подачи – 1,9 м/с; общая продолжительность цикла – 65 с; объем собираемой пачки – $1,0 \text{ м}^3$.

Фреза и ее резец представлены на рис. 3.

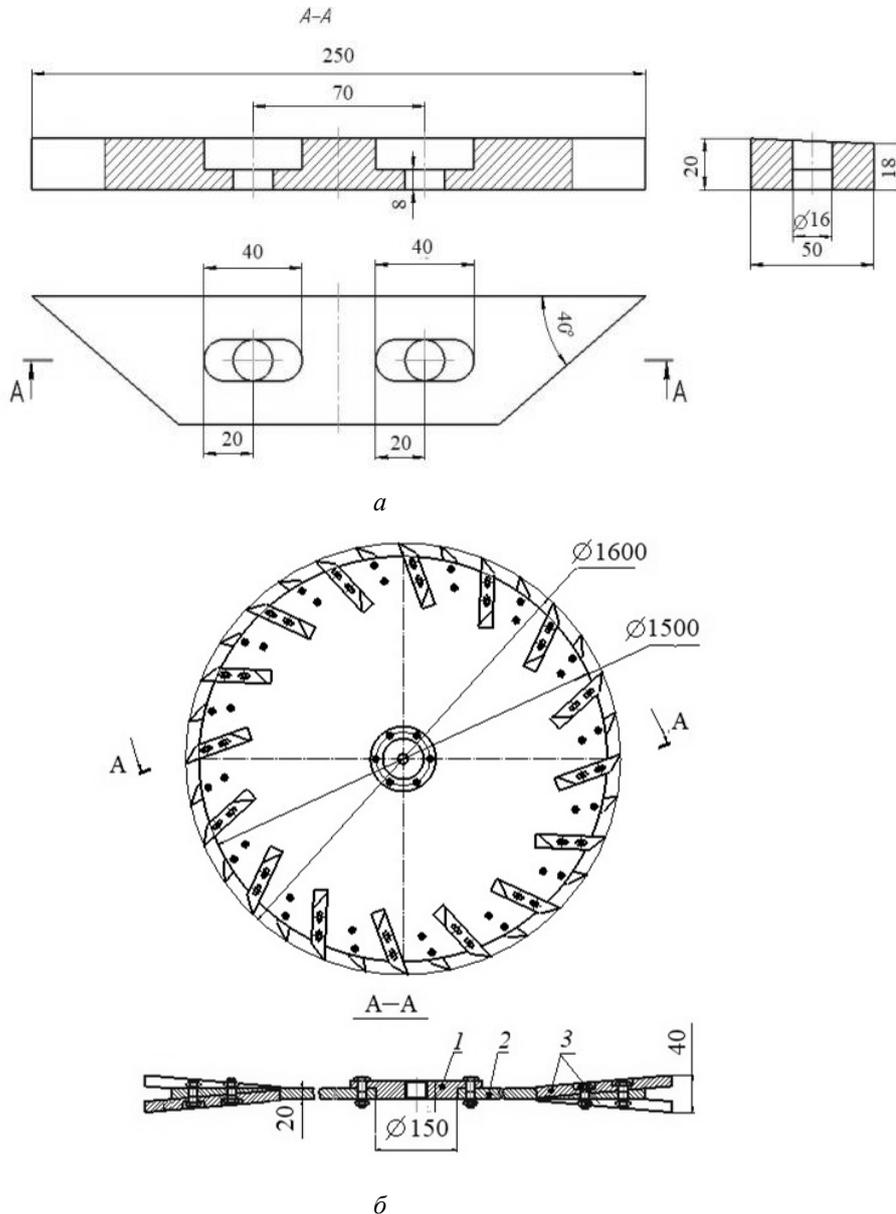


Рис. 3. Чертеж резца (а, вид сверху) и фрезы (б):

1 – ступица; 2 – диск; 3 – резцы

Fig. 3. Drawing of an incisor (a, top view) and a cutter (б):

1 – hub; 2 – disks; 3 – incisors

Оборудование работает следующим образом. Фреза в процессе вращения и поворота надстройки ЛП-19В (см. рис 2, (1)) срезает лес и формирует пачку на защитном диске. От падения срезанные деревья удерживаются за-

хватами откладчика пачек. После поворота на 180° надстройка останавливается, пачка по инерции сбрасывается на полосу, параллельную ходу машины, которая движется вперед на 1,5 м. Включается поворот надстройки, и цикл повторяется. Привод фрезы гидравлический, выбор требуемой частоты ее вращения достигается подбором рабочего объема гидравлического двигателя.

Результаты исследования и их обсуждение

Производительность проектируемого оборудования для лесосводки к ЛП-19В рассчитывали, используя данные таксации 1257 деревьев на 1 га. Тогда количество стволов на 1 рез составляет 7,1 шт., объем леса, срезаемого за 1 цикл (объем пачки), – 0,994 м³.

Общая продолжительность цикла (T_{Σ} , с) согласно технической характеристике модернизированного ЛП-19В с проектным оборудованием для срезки леса является суммой элементов цикла [10, 14, 15]:

$$T_{\Sigma} = t_{дв} + t_{ср} + t_{ост.п} + t_{пов} + t_{ост}, \quad (1)$$

где $t_{дв}$ – время передвижения агрегата на величину диаметра фрезы, с; $t_{ср}$ – время, затраченное на срез деревьев при повороте надстройки, с; $t_{ост.п}$ – время остановки поворота и сброса пачки хлыстов, с; $t_{пов}$ – время обратного или попутного холостого поворота надстройки, с; $t_{ост}$ – время остановки надстройки и подготовки к следующему циклу, с.

Расчет выполняется на основании технической характеристики проектируемого оборудования и древостоев на очищаемой площади леса. Подставим рассчитанные значения в (1) и получим

$$T_{\Sigma} = 15,0 + 19,8 + 5,0 + 19,8 + 5,0 = 64,6 \text{ с.}$$

Эксплуатационная производительность за смену (Π_3 , м³/ч) ЛП-19В с диско-фрезерным рабочим органом:

$$\Pi_3 = \Pi_T - K_{ИРВ} - K_T - T_{см}, \quad (2)$$

где Π_T – производительность за один цикл ЛП-19В с фрезой, $\Pi_T = 64,6 \text{ с/м}^3$; $K_{ИРВ}$ – коэффициент использования рабочего времени, $K_{ИРВ} = 0,7$; K_T – коэффициент технологичности, $K_T = 0,9$; $T_{см}$ – продолжительность смены, $T_{см} = 8 \text{ ч}$.

Таким образом, за смену

$$\Pi_3 = \frac{0,994 \cdot 3600}{64,6} \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 8 = 279,18 \text{ м}^3,$$

где 0,994 – объем пачки, м³; 64,6 – время цикла, с; 3600 – число секунд в 1 ч.

Производительность оборудования МУП-14 для срезания пней к ТЛП-100 при подготовке усов для вывозки пачек сваленного леса к погрузочной площадке определяется количеством пней, подлежащих срезу, на 1 км трассы вывозки пачек леса на пути движения форвардера (K , шт./км трассы) [11]:

$$K = \frac{BLN}{10000}, \quad (3)$$

где B – ширина уса, $B = 2,6 \text{ м}$; L – длина уса, $L = 1000 \text{ м}$; N – количество пней, $N = 1257 \text{ шт./га}$.

Получаем $K = 327 \text{ шт./км}$.

При расчетной производительности машины 80 шт. пней/ч [10] ее рабочая скорость (V_r , км/ч) находится как отношение расчетной производительности по срезу пней (шт./ч) к количеству пней на 1 км расчищаемого уса (шт./км) и составит 0,25 км/ч.

Эксплуатационная производительность МУП-4 (V_s , км/ч) с учетом коэффициента использования рабочего времени смены ($K_{ирв} = 0,8$) и коэффициента технологичности ($K_t = 0,9$) составит 0,18 км/ч, или 0,05 м/с [10, 13].

Расчет оптимальной площади леса, вырубаемого с одного расположения временного нижнего склада, и размеров пасек производится на основании схемы разработки пасеки и вывозки леса (рис. 4).

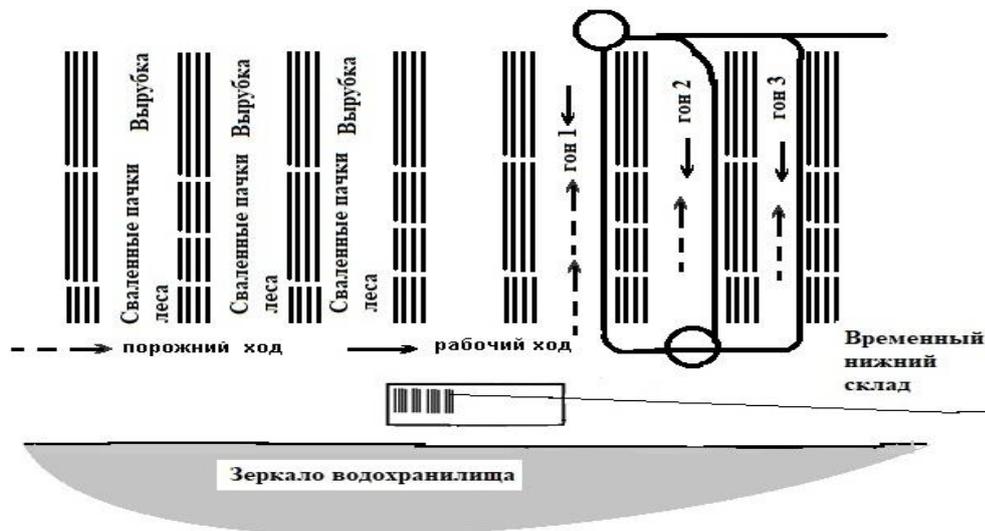


Рис. 4. Схема срезания пней и вывозки пачек леса из пасеки гусеничным форвардером «Онежец» ТБ-1 МА-16

Fig. 4. Scheme of stump cutting and removal of wood bundles from forest swath by crawler forwarder "Onezhets" TB-1 MA-16

Продолжительность одного цикла $T_{ц}$, начиная со сбора вoза и вывозки форвардером, определяется по показателям его технической характеристики:

$$T_{ц} = \frac{L_r}{V_{xx}} + t_{пов} + (t_{п} n n_{цп}) + t_{пд} + \frac{L_r - l_{сб}}{V_{гх}} + t_{пов} + t_{выгр}, \quad (4)$$

где L_r – длина гона, м; V_{xx} – скорость холостого хода порожнего форвардера, м/с; $t_{пов}$ – время, затрачиваемое на поворот форвардера, с; $t_{п}$ – время погрузки одной пачки леса гидроманипулятором форвардера, с; n – число пачек леса, размещаемое на форвардере, шт.; $n_{цп}$ – время укладки прокладок после погрузки пяти пачек, с; $t_{пд}$ – время подготовки к движению (убрать манипулятор, включить передачу), с; $l_{сб}$ – расстояние сбора вoза форвардером, м; $V_{гх}$ – скорость хода загруженного форвардера, м/с; $t_{выгр}$ – время разгрузки форвардера плавучим краном, с.

Принимаем следующие варианты расчетов.

Первый вариант – длина пасеки 120 м исходя из предпосылок: шаг укладки пачек 1,5 м; количество пачек объемом 1 м³, загружаемое на форвар-

дер, – 10 шт. Отсюда длина пути погрузки – 5 м. На гоне 120 м получаем 8 рейсов на пасеку.

Второй вариант – длина пасеки 240 м, при этом число рейсов на пасеку – 16.

При конструктивно заданном расстоянии по ширине между проходами ЛП-19В с фрезерным рабочим органом 24 м конечной целью расчетов является определение размера лесосеки до перебазирования места погрузки по берегу водохранилища.

Подставляя численные значения в выражение (4), получим продолжительность одного цикла для каждого гона вдоль одной пасеки по вариантам длин пасек. Сумма времени движения форвардера для сбора пачек поваленного леса с одной пасеки длиной 120 м $T_{\Sigma\text{цф}} = 1,484 \text{ ч} \approx 1,5 \text{ ч}$.

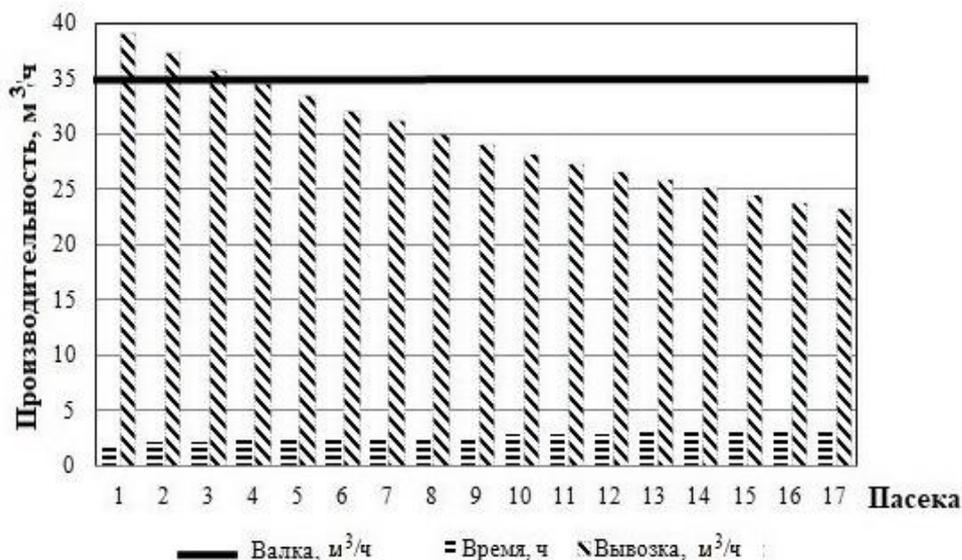
Время движения форвардера по ширине вырубki ($T_{\text{цш}}$, ч) и полное время очистки лесосеки $T_{\Sigma\text{п}}$ определяются как сумма времени сбора пачек на одной пасеке и времени, затрачиваемого на переезды от пасеки к пасеке на расстоянии, кратное 24 м:

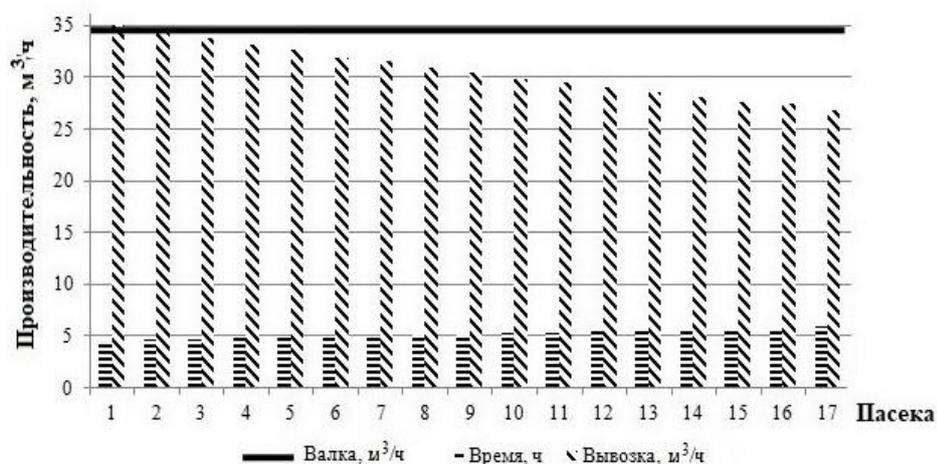
$$T_{\text{цш}} = T_{\Sigma\text{цф}} + \left(\frac{l_{\text{хх}}}{V_{\text{хх}}} + \frac{l_{\text{гх}}}{V_{\text{г}}} \right) \kappa, \quad (5)$$

где $l_{\text{хх}}$ – расстояние холостого пробега между пасеками, м; $l_{\text{гх}}$ – расстояние пробега с грузом между пасеками, м; κ – число форвардеров, работающих на вывозке леса с одной пасеки, шт.

Графически результаты работы по вывозке леса форвардером с пасек длиной 120 и 240 м при их ширине 24 м показаны в виде диаграмм на рис. 5.

Из диаграмм, приведенных на рис. 5, следует, что производительность по валке не обеспечена вывозкой после очистки третьей пасеки при ее длине 120 м и уже после очистки первой пасеки при длине 240 м.





б

Рис. 5. Зависимость производительности форвардера от числа обрабатываемых пасаек при их длине 120 (а) и 240 м (б)

Fig. 5. Dependence of the forwarder productivity on the number of processed forest swaths at their lengths of 120 (a) and 240 m (b)

Расчет времени на срезание пней трактором, оснащенным оборудованием машины МУП-4 для срезания пней, производим с учетом протяженности волоков согласно схеме (см. рис. 4). Суммарная длина волоков (L_B , км) складывается из длин пути вывоза вдоль пасаек $l_{вп}$, пути вывоза поперек пасаек $l_{пп}$ и пути поворотов $l_{пов}$:

$$L_B = l_{вп} + l_{пп} + l_{пов} + l'_{пов}, \quad (6)$$

где $l_{пов}$ – длина пути при повороте на 180° , $l_{пов} = \pi R_{пов}$; $R_{пов}$ – радиус поворота, м; $l'_{пов}$ – длина пути при повороте на 90° , $l'_{пов} = \pi R_{пов}$.

Определяем суммарную длину рабочих ходов (L_Σ , м) на подготовку волоков по двум вариантам лесозаготовок (с длиной пасаек 120 и 240 м) для всех пасаек:

$$L_\Sigma = L_e + L_{рх.посл} (N-1) + L_{хх} (N-1) + L_{возвр}, \quad (7)$$

где L_e – путь до места срезания пней, м; $L_{рх.посл}$ – длина пути последнего рабочего хода, м; N – число пасаек, шт.; $L_{хх}$ – длина пути на холостом ходу без срезания пней, м; $L_{возвр}$ – длина пути возвращения на базу, м.

Затраты времени (T_Σ , ч) на расчистку волоков от пней:

$$T_\Sigma = \frac{\left(\frac{L_{рх}}{V_{рх}} + \frac{L_{хх}}{V_{хх}} \right)}{3600}. \quad (8)$$

Время работы второго форвардера на вывозке леса $T_{выб}$ по вариантам определится как разность общего времени цикла и времени работы трактора ЛХТ-100 из-под второго форвардера на срезке пней с учетом затрат времени на переоборудование (отсоединение и обратное подключение полуприцепа,

а также монтаж-демонтаж машины МУП-4), принимаемых по инструкциям на форвардер «Онежец» ТБ1-МА-16 и МУП-4, – 4,25 ч.

Из полученных данных имеем объем вывозки вторым форвардером: по первому варианту – 552 м³; по второму – 1485 м³.

Полученные значения покрывают дефицит вывозки и позволяют создавать резерв на время перебазирования плавучего крана и барж на новую стоянку.

Графически результаты работы по вывозке леса одним форвардером с подключением второго форвардера после его высвобождения от работ по прокладке лесовозных усов машиной МУП-4 для пасек длиной 120 и 240 м (при их ширине 24 м) показаны в виде диаграмм на рис. 6.

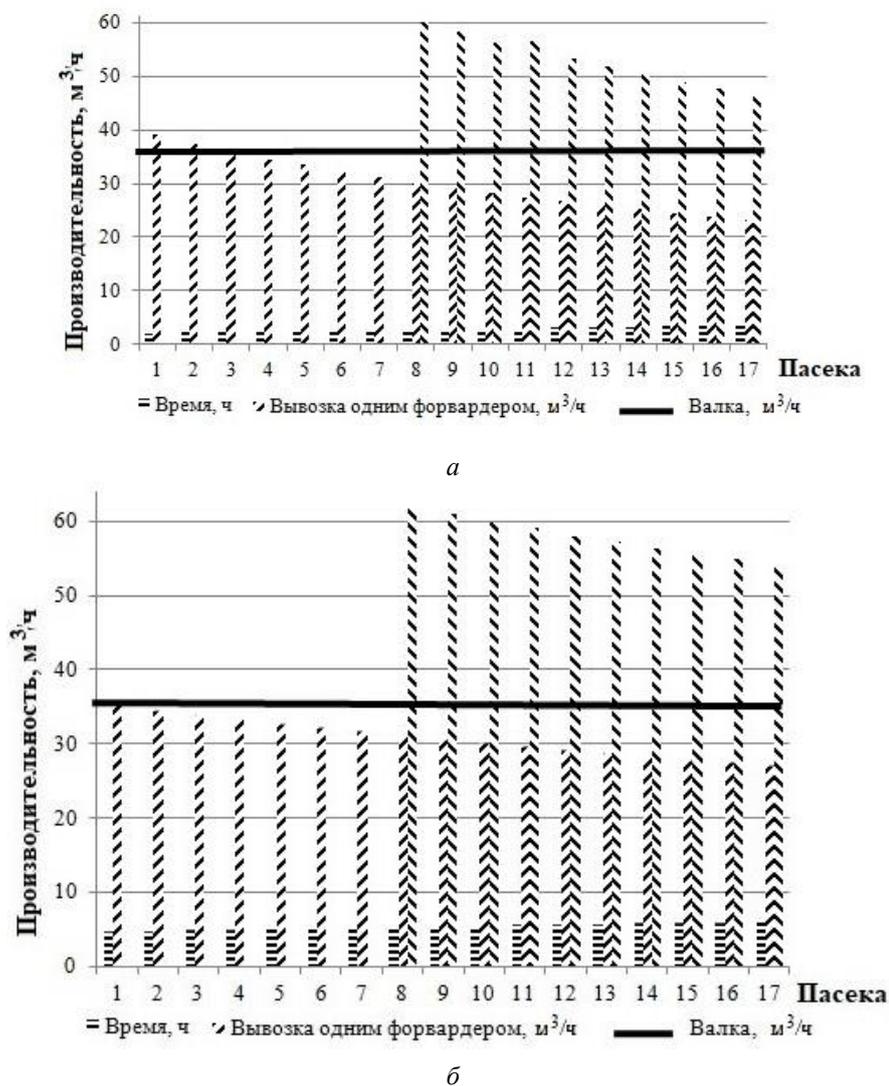


Рис. 6. Зависимость производительности двух форвардеров от числа обрабатываемых пасек при длине пасек 120 (а) и 240 м (б)

Fig. 6. Dependence of the productivity of two forwarders on the number of processed forest swathes at their lengths of 120 (a) and 240 m (b)

Из приведенных диаграмм можно сделать вывод, что оптимальная длина пасаки составляет 240 м. При этом перебазирование места погрузки производится после выработки 34 пасаек в обе стороны от места погрузки на расстояние 800...1000 м один раз за 11–12 дней, что обеспечивает постоянный характер работ. Превышение производительности вывозки леса по сравнению с его валкой проектным оборудованием обеспечивает резерв времени на проведение ремонтов и технического обслуживания техники без ущерба для выполнения работ.

Учет влияния кинетической энергии при расчетах дисковых фрез на срезании растущих деревьев. Определение предельных диаметров древесных стволов, срезаемых дисковой фрезой, и расчет усилий на резах производим с учетом кинетической энергии, развиваемой фрезой [9, 12, 13].

Примем, что при прорезании древесных включений источником энергии является двигатель агрегата и запасенная кинетическая энергия вращающихся частей трансмиссии и фрезы. Энергия расходуется на резание и сообщение кинетической энергии фрезеруемой древесине. При скорости подачи $V_n = 1,9$ м/с время перерезания (T , с) ствола дерева диаметром $d = 0,15...0,20$ м составит 0,08 с.

В соответствии с этим запишем уравнение баланса энергии при перерезании ствола дерева диаметром $d = 0,15...0,20$ м:

$$A_{\text{дв}} + A_{\text{фр.кин}} = A_{\text{рез}} + A_{\text{др.кин}}, \quad (9)$$

где $A_{\text{дв}}$ – энергия, подводимая двигателем за время резания, Дж; $A_{\text{фр.кин}}$ – энергия, передающаяся от фрезы за счет уменьшения ее угловой скорости, Дж; $A_{\text{рез}}$ – энергия, необходимая для резания, Дж; $A_{\text{др.кин}}$ – кинетическая энергия, сообщаемая древесной стружке, Дж.

Расчеты показывают, что можно пренебречь $A_{\text{дв}}$ и $A_{\text{др.кин}}$, поскольку они частично компенсируют друг друга. Тогда

$$A_{\text{фр.кин}} = 0,5 C_{\text{фр}} (\omega^2 - \omega_1^2) J; \quad (10)$$

$$A_{\text{рез}} = \rho_{\text{др}} \frac{\pi d^2}{4} b, \quad (11)$$

где $C_{\text{фр}}$ – коэффициент, учитывающий моменты инерции остальных вращающихся масс оборудования (ступицы, гидродвигателя, соединительной муфты), $C_{\text{фр}} = 1,1$; ω – номинальная угловая скорость фрезы, $\omega = 69$ рад/с; ω_1 – минимально допустимая угловая скорость вращения фрезы, $\omega_1 = 52$ рад/с; J – момент инерции вращающихся масс фрезы и деталей трансмиссии ее привода, кг·м²; $\rho_{\text{др}}$ – удельное сопротивление резанию осины, $\rho_{\text{др}} = 1,25 \cdot 10^6$ Н/м³; b – ширина пропила, $b = 0,04$ м.

Для получения искомого диаметра (d , м), прорезаемого за счет сил инерции дерева, используем выражение [12]:

$$d = \sqrt{\frac{2C_{\text{фр}} (\omega^2 - \omega_1^2) J_{\text{ф}}}{\rho_{\text{др}} b}}, \quad (12)$$

где $J_{\text{ф}}$ – момент инерции вращающихся масс фрезы, кг·м², слагаемый из момента инерции резцов $J_{\text{р}}$ и диска $J_{\text{д}}$:

$$J_{\phi} = J_p + J_d = \frac{B_p S_p L_p \gamma n_p}{1000} R_p^2 + \frac{(\pi R_{\phi d}^2 S_{\phi d} \gamma) R_{\phi d}^2}{1000 \cdot 2}, \quad (13)$$

B_p, S_p, L_p – ширина, толщина и длина резца соответственно, м; γ – удельный вес стали, кг/м³; n_p – число резцов на фрезерном диске, шт.; R_p – радиус окружности центра тяжести резцов, м; $R_{\phi d}$ – радиус фрезерного диска, м; $S_{\phi d}$ – толщина фрезерного диска, м.

Подставляя численные значения в формулу (13), получим $J_{\phi} = 132 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $d = 0,62 \text{ м}$.

Для 7 стволов по длине дуги поворота общее сечение прорезаемого дерева равно $0,124 \text{ м}^2$, в то же время площадь среза дерева диаметром $d = 0,62 \text{ м}$ составляет $0,30 \text{ м}^2$, т. е. коэффициент запаса по резанию равен 2,4, что подтверждает возможность выполнения среза за счет сил инерции.

При $V_n = 1,9 \text{ м/с}$ время срезания 7 стволов составит 0,55 с. Мощность (N , кВт), развиваемая фрезой за счет кинетической энергии [5, 11]:

$$N = \frac{\pi r_{\text{др}} V_n b d}{408}. \quad (14)$$

Кинетическая энергия для теоретически возможного диаметра прорезаемого дерева 0,62 м составит 453,00 кВт. Фактическое значение мощности для реального прорезаемого дерева диаметром до 0,30 м на участке лесосводки по таксационным показателям – 168,45 кВт.

Максимальное сопротивление подаче ($P_{\text{рез}}, \text{Н}$) фрезы возникает при достижении концами ножей центра пропиливаемого дерева диаметром 0,62 м:

$$P_{\text{рез}} = 2\rho \frac{V}{\omega_{\text{ср}}} \frac{b d}{D}, \quad (15)$$

где V – скорость резания, м/с; $\omega_{\text{ср}}$ – среднеарифметическое значение угловой скорости вращения фрезы, рад; D – диаметр фрезы по концам резцов, м.

Для толщины срезаемой стружки 5,4...7,0 мм при максимальной и минимальной частоте вращения фрезерного диска $P_{\text{рез}} = 12,2 \text{ кН}$. Данное усилие следует учитывать при конструировании крепления резцов и оборудования к ружьяти ЛП-19В.

Привод фрезы необходимо производить с частотой вращения 11 с^{-1} . Принимая вариант гидравлического редуцирования частоты вращения гидродвигателя привода фрезы, выбираем гидромотор 210.32. Полный КПД гидро-системы составит 0,81, объемный КПД – 0,93.

Расчет устойчивости агрегата в продольном и поперечном направлениях. Устойчивость агрегата в вертикальной плоскости определяют по коэффициенту запаса устойчивости (K_y) [3, 11]:

$$K_y = \frac{M_{\text{уст}}}{M_{\text{опр}}} \geq 1,4 - 1,5, \quad (16)$$

где $M_{\text{уст}}$ и $M_{\text{опр}}$ – соответственно суммарные моменты устойчивости и опрокидывания машины относительно А-А (внешний край опорных катков наиболее нагруженной гусеницы) и Б-Б (вертикальная плоскость по оси заднего опорного катка агрегата).

Для расположения рабочего органа сбоку агрегата моменты устойчивости и опрокидывания вычисляются по [11, 12, 14]:

$$M_{уст}^{A-A} = G_a \left(\frac{b_6 + b_r}{2} - a + x_r \right); \quad (17)$$

$$M_{опр}^{A-A} = G_c \left(x_{po} - \frac{b_6 + b_r}{2} + a \right) + G_p \left(x_p - \frac{b_6 + b_r}{2} + a \right) + G_{po} \left(x_{np} - \frac{b_6 + b_r}{2} + a \right), \quad (18)$$

где G_a – масса агрегата без оборудования, стрелы и рукояти, Н; b_6 – ширина колеи, м; b_r – ширина гусеницы, м; a – расстояние от края гусеницы до линии опорных катков, м; x_r – координата центра тяжести базовой машины при ее положении с поворотом надстройки на 90° , м; G_c – масса стрелы, Н; G_p – масса рукояти, Н; G_{po} – масса рабочего оборудования, Н; x_{po} , x_p , x_{np} – координаты центров массы рабочего органа, рукояти и навески откладчика, м.

Моменты устойчивости и опрокидывания агрегата в поперечной плоскости составят 513 700 и 216 323 Н·м соответственно, коэффициент запаса устойчивости – 2,37.

Моменты устойчивости и опрокидывания агрегата в продольной плоскости при расположении рабочего оборудования перед агрегатом находим, используя следующие выражения [11, 14]:

$$M_{уст}^{B-B} = G_a \cdot \left(\frac{l_6}{2} + y_a \right); \quad (19)$$

$$M_{опр}^{B-B} = G_c \left(y_c - \frac{l_6}{2} \right) + G_p \left(y_p - \frac{l_6}{2} \right) + G_{po} \left(y_{po} - \frac{l_6}{2} \right), \quad (20)$$

где l_6 – длина базы агрегата, м; y_a , y_c , y_p и y_{po} – расстояние от середины опорной поверхности гусениц до центра тяжести соответственно агрегата, стрелы, рукояти и рабочего органа (фрезы с приводом и откладчиком пачек), м.

Моменты устойчивости и опрокидывания агрегата в продольной плоскости составят 539 385 и 218 446 Н·м, коэффициент запаса устойчивости – 2,47. Ввиду незначительной (2 км/ч) скорости движения, а также высоких значений запаса устойчивости в статике расчет динамической устойчивости агрегата не требуется.

Напряженность труда оператора. Зависит от частоты его воздействия на рычаги управления. На проектном агрегате она снизилась в 10 раз (на 89,6 %). Кроме того, на базовой машине при спиливании и укладке дерева в пачку необходимо все воздействия на рычаги управления выполнять с высокой точностью, следя за положением рабочего органа. За смену оператор базового ЛП-19В производит 12 000 операций управления, а на проектном агрегате – всего 1 240. На проектном агрегате оператор, включив в начале пачки фрезу, просто продвигает агрегат вперед и периодически включает поворот надстройки, что делает его труд менее утомительным [19, 23].

Базовый агрегат работает при резко переменном режиме нагрузки, так как в каждом цикле повала дерева нагрузка изменяется от холостого хода до максимального. Проектный агрегат работает в более стабильном нагрузочном

режиме – фреза вращается постоянно, надстройка поворачивается тоже почти без остановок.

Расход топлива на 1 м³ срезанного леса по базовому варианту составляет 2,5 дм³; по проектному – 0,7 дм³.

Выводы

1. Разработана технология очистки ложа затопляемого водохранилища от леса, базирующаяся на использовании мобильных машин, позволяющих производить эту работу качественно. Основным механизмом для проведения лесочистки является дополнительное оборудование к валочно-пакетирующей машине ЛП-19В, которое обеспечивает высокопроизводительную работу в маломерных насаждениях при объеме хлыста до 0,15 м³.

2. Предложена организация технологического процесса, позволяющая повысить производительность труда, снизить капитальные вложения на проведение лесочистки, а также обеспечить качественную очистку ложа водохранилища.

3. Приведена методика расчета затрат энергии дисковых фрез при срезании растущих деревьев, что позволяет получить конструктивные и геометрические параметры фрез, а также режимы резания еще в процессе проектирования.

4. Доказано, что повышение эффективности использования агрегата для срезания маломерных лесонасаждений возможно за счет оптимизации его энергетических и динамических параметров, выбора рациональной технологии процесса лесочистки.

5. Обоснован выбор базовой машины, конструкции рабочего органа, режимов его работы и технологии проведения работ.

6. Установлено, что предложенные организация технологического процесса и конструкция оборудования позволяют повысить производительность труда, снизить капитальные вложения на проведение лесочистки и обеспечивают наиболее качественную очистку ложа водохранилища по сравнению с базирующейся на серийно выпускаемом ЛП-19В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александров В.А. Механизация лесосечных работ в России. СПб.: Профи, 2009. 256 с. [Aleksandrov V.A. *Mechanization of Logging Operations in Russia*. Saint Petersburg, Profi Publ., 2009. 256 p.]

2. Богучанская ГЭС на реке Ангаре. Технический проект: в 3 т. Т. III. Водохранилище и охрана окружающей среды. Кн. 1. Водохранилище. М.: Гидропроект, 1976. 219 с. [Boguchany Hydro Power Plant on the Angara River. *Technical Project*. In 3 vol. Vol. 3. Reservoir and Environmental Protection. Book 1. Reservoir. Moscow, Gidroyekt Publ., 1976. 219 p.]

3. Верхов Ю.И. Проектирование погрузочно-транспортных машин с учетом их колебаний. Красноярск: КГТА, 1986. 175 с. [Verkhov Yu.I. *Design of Forwarders with Allowances Made for Their Vibrations*. Krasnoyarsk, KGTA Publ., 1986. 175 p.]

4. Григорьян В.Г. Торфяные машины и их эксплуатация. М.: Высш. шк., 1982. 232 с. [Grigoryan V.G. *Peat Machines and Their Operation*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 232 p.]

5. Карнаухов А.И. Лесопожарные агрегаты с торцевой фрезой. Концепция энергосбережения: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2011. 220 с. [Karnaukhov A.I. *Forest Fire Units with a Face Cutter. Energy Saving Concept*: Monograph. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2011. 220 p.].

6. Корпачев В.П., Малинин Л.И., Чебых М.М. Методика прогнозирования поступления древесной массы при затоплении и эксплуатации водохранилищ ГЭС Ангаро-Енисейского региона // Использование и восстановление ресурсов Ангаро-Енисейского региона: сб. науч. тр. всесоюз. науч.-практ. конф. Т. II. Красноярск, Лесосибирск, 1991. С. 107–113. [Korpachev V.P., Malinin L.I., Chebykh M.M. Prediction Technique of Wood Pulp Income during Flooding and Operation of Reservoirs of HPP of the Angara-Yenisei Region. *Use and Restoration of Resources of the Angara-Yenisei Region: Collection of Academic Papers of the All-Union Scientific and Practical Conference. Vol. 2*. Krasnoyarsk, Lesosibirsk Publ., 1991, pp. 107–113].

7. Корпачев В.П., Сладикова С.М., Пережилин А.И. Оценка запасов древесной массы в водохранилище Богучанской ГЭС в процессе его подготовки и эксплуатации. Красноярск: СибГТУ, 2007. 94 с. [Korpachev V.P., Sladikova S.M., Perezhilin A.I. *Assessment of Wood Pulp Reserves in the Boguchanskaya HPP Reservoir in the Process of Its Preparation and Operation*. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2007. 94 p.].

8. Логинов Т.И., Лещ-Борисовский А.И., Фогель Д.Н. Лесосводка и лесочистка водохранилищ гидротехнических сооружений. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 136 с. [Loginov T.I., Leshch-Borisovskiy A.I., Fogel' D.N. *Logging and Forest Cleaning of Reservoirs of Hydraulic Engineering Structures*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 136 p.].

9. Онейко Ф.А. Торфяные машины. Минск: Вышэйш. шк., 1968. 408 с. [Oneyko F.A. *Peat Machines*. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1968. 408 p.].

10. Орловский С.Н. Проектирование машин и оборудования для садово-паркового и ландшафтного строительства. Красноярск: СибГТУ, 2004. 108 с. [Orlovsky S.N. *Design of Machinery and Equipment for Garden and Landscape Construction*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2004. 108 p.].

11. Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машино-тракторных агрегатов: моногр. Красноярск: КрасГАУ, 2011. 376 с. [Orlovsky S.N. *Determination of Energy and Dynamic Parameters of Tractors, Cutting Modes of Active Working Bodies of Machine-Tractor Units*: Monograph. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2011. 376 p.].

12. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров и режимов работы роторных рабочих органов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 4. С. 70–76. [Orlovsky S.N., Karnaukhov A.I. Theoretical Background of Rotary Tools Parameters and Operating Modes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 4, pp. 70–76]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/4d2/dggj1.pdf>

13. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Обоснование технологии применения и компоновки агрегата для понижения пней // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 123–131. [Orlovskiy S.N., Karnaukhov A.I. Application and Configuration Technology of the Stump Lowering Device. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 3, pp. 123–131]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.3.123](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.123); URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/111/2_orlovskiy.pdf

14. Полетайкин В.Ф. Динамика переходных режимов работы лесных погрузчиков // Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: КГТА, 1993. С. 32–51. [Poletaykin V.F. Dynamics of Transient Modes of Operation of Forest Loaders. *Intercollegiate Collection of Academic Papers*. Krasnoyarsk, KGTA Publ., 1993, pp. 32–51].

15. Полетайкин В.Ф., Авдеева Е.В. Погрузочные машины. Красноярск: СибГТУ, 2001. 200 с. [Poletaykin V.F., Avdeyeva E.V. *Loading Machines*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2001. 200 p.].

16. Разработка мероприятий по лесосводке и лесоочистке в зоне водохранилища Богучанского гидроузла на реке Ангаре: отчет о НИР. Красноярск: Сиб. междунар. ин-т леса, 2006. 19 с. [*Development of Measures for Logging and Forest Cleaning in the Area of the Reservoir of the Boguchany Hydrosite on the Angara River: Research Report*. Krasnoyarsk, Noncommercial Research Institution "Siberian International Institute of Forest", 2006. 19 p.].
17. Разработка прогноза засорения и загрязнения водохранилища Богучанской ГЭС древесной массой и органическими веществами, комплекса предложений по очистке водохранилища от древесной массы: отчет о НИР / Красноярск: СибГТУ, 2006. 90 с. [*Development of the Forecast of Clogging and Pollution of the Boguchany HPP Reservoir with Wood Pulp and Organic Substances; a Set of Proposals for Cleaning the Reservoir from Wood Pulp: Research Report*. Krasnoyarsk, SibSTU, 2006. 90 p.].
18. Bell J.L. Changes in Logging Injury Rates Associated with Use of Feller-Bunchers in West Virginia. *Proceedings of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium*. Seattle, WA, 2001, pp. 28–36.
19. Jones P.C., Hawkes J.H. *Stump Grinders*. Austin, TX, UT Press, 2014. 156 p.
20. Leon B.H., Benjamin J.G. *A Survey of Business Attributes, Harvest Capacity and Equipment Infrastructure of Logging Businesses in the Northern Forest*. Orono, ME, University of Maine, 2012. 29 p.
21. Spinelli R., Cuchet E., Roux P. A New Feller-Buncher for Harvesting Energy Wood: Results from a European Test Programme. *Biomass and Bioenergy*, 2006, vol. 31, iss. 4, pp. 205–210. DOI: [10.1016/j.biombioe.2006.08.002](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.08.002)
22. Spinelli R., Hartsough B.R., Owende P.M.O., Ward S.M. Productivity and Cost of Mechanized Whole-Tree Harvesting of Fast-Growing Eucalypt Stands. *International Journal of Forest Engineering*, 2002, vol. 13, iss. 2, pp. 49–60. DOI: [10.1080/14942119.2002.10702462](https://doi.org/10.1080/14942119.2002.10702462)
23. Teggin R., Kavadiatti S., Hebbal S. Design and Fabrication of Machine Performing Multiple Wood Working Operations. *Proceeding of NCRIET-2015 & Indian Journal of Scientific Research*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 162–167.

SUBSTANTIATION OF THE TECHNOLOGY OF MECHANIZED CLEAR-CUTTING OF RESERVOIR BEDS AND EQUIPMENT ARRANGEMENT FOR ITS IMPLEMENTATION

S.N. Orlovsky, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6780-2019](https://orcid.org/0000-0001-8904-834X),
ORCID: [0000-0001-8904-834X](https://orcid.org/0000-0001-8904-834X)

Krasnoyarsk State Agrarian University, prosp. Mira, 90, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

The issue of cleaning reservoir beds during the construction of cascades of hydroelectric power plants is relevant. In current practice, forest clearance is carried out in the form of clear-cutting 15–20 years before the flooding of the area. Herewith, the fact that even before flooding, the reservoir bed is secondly overgrown with fine-sized deciduous species with trunk diameter of up to 15 cm, average volume per tree of which is 3–5 times less than that of previous stands, is ignored. In view of this, it turned out that the use of existing harvesting and logging equipment is ineffective in this type of works. It is necessary to develop machines and technologies that ensure the fulfillment of the assigned task. The research purpose is to develop a technology for cleaning the reservoir bed (on the example of the Boguchany Hydro Power Plant (HPP) on the Angara river) from secondary overgrowing after clear-cutting; as well as the design and arrangement of equipment for the feller-buncher LP-19V for trees cutting, and the technology of its application. The research agenda

includes an analysis of wood cutting forces with regard to inertial forces; calculations of the productivity of the unit for cutting stands and their transportation to the place of loading; sizing of forest swathes, their number and skidding or haulage distances; study of use modes of equipment for cutting stumps, forest clearance and hauling. A design of the working body for the feller-buncher LP-19V is proposed, including a disk cutter and a packer, which allows to increase its productivity in cutting areas by 3–4 times with a whip volume of about 0.14 m³. A technology for loading and delivering timber to barges, and processing unmerchantable wood has been developed. The proposed technology for recleaning the reservoir bed of a hydro power plant allows to fully mechanize the technological process of forest clearance, reduce labour costs and improve the cleaning quality, reduce the negative effects associated with flooding of tree stands while filling HHP reservoirs.

For citation: Orlovsky S.N. Substantiation of the Technology of Mechanized Clear-Cutting of Reservoir Beds and Equipment Arrangement for Its Implementation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 128–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-128-145

Keywords: reservoir, forest clearance, technology, mechanization, cutting of stands, arrangement, design.

Поступила 13.01.19 / Received on January 13, 2019



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

UDC 674.02

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-146-153

THERMAL CONDUCTIVITY OF WOOD-BASED CELLULAR STRUCTURES

A.A. Lukash, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.

N.P. Lukutsova, Doctor of Engineering, Prof.

Bryansk State Technological University of Engineering, prosp. Stanke Dimitrova, 3A,
Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: mr.lukasch@yandex.ru, natluk58@mail.ru

A physical model is developed for heating a set of laminated cellular structure formed from peeled veneer, dependences for determining its thermal conductivity under conditions of non-stationary heat transfer are proposed. It was found that for a package of 11 layers of birch veneer 2 mm thick, the thermal diffusivity is $1.93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Based on the fundamental theory of thermal conductivity of the wood substance, dependencies are obtained for calculating the duration of bonding of heat-insulating materials of a cellular structure. It has been established that the duration of gluing of a 22 mm thick plywood mesh slab of peeled birch veneer under pressure exposure is 14.5 minutes at a temperature of press plates 110 °C. The thermotechnical characteristics of the new wood-based cellular structure material were determined: the thermal conductivity coefficient of a cellular plywood board with a density of 530 kg/m^3 was $0.081 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, the strength under static bending of the board parallel to the fibers of the outer layers was 14 MPa, and perpendicular to the fibers was 10 MPa. The use of underutilized soft broadleaved species with low operational properties as a heat-insulating material, where high strength indicators are not required, is justified, since its thermal conductivity is two times lower than that of a similar material – solid plywood board.

For citation: Lukash A.A., Lukutsova N.P. Thermal Conductivity of Wood-Based Cellular Structures. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 146–153. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-146-153

Keywords: plywood cellular board, hardwood, thermal conductivity, veneer, gluing, heat exchange.

Introduction

Housing is an actively developing industry. Wood has certain strength characteristics and good heat insulation indicators. Low-rise wooden house construction provides the most favorable and comfortable living conditions [3, 5]. The creation of effective heat insulation materials for wooden house construction is in accordance with Federal Law No. 261-FL “On Energy Saving and on Improving Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation.” Besides that, the use of broadleaved species corresponds to the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation for the period up to 2020 [11]. Therefore, the topic of research aimed at improving technologies for the creation of effective thermal insulation materials from underutilized wood species is relevant and significant.

The aim of the research is to determine the thermal conductivity of new wood materials of cellular structure made of peeled veneer. Scientific novelty is dependencies for determination of thermal conductivity of cellular construction materials.

The possibility of creating new thermal insulation materials from hardwood with thermal insulation properties superior to those of existing similar products is theoretically and experimentally justified. The practical significance of the research lies in the development of resource-saving and energy-saving technologies for obtaining new heat-insulating materials with improved thermal characteristics from wood with low operational properties.

The material studied was hardwood deciduous species. The provisions of the theory of thermal conductivity of wood were applied.

Results of studies

Good performance properties of coniferous wood [17] provide increased demand, as a result of which there is a shortage in the Central European part of the country. The volume of use of deciduous species is only 15 % of the annual estimated cutting area. Therefore, the issues of processing of low-demand deciduous species are relevant for the industry of our country. In addition, in industrialized countries there is an increased interest in the practical use of hardwood due to its rapid growth [14, 19].

Wood materials from deciduous species most rationally to apply for thermal insulation in construction where high strength indicators are not required. But new building materials will be in demand if they have higher performance than existing similar products.

As is known, the main difference between the microstructure of hardwoods and conifers is the presence of vessels [1, 12]. Highly developed vessels displace adjacent cells, so that hardwood does not have the correct structure that is characteristic of softwood. Presence of vessels provides good impregnation properties [13, 15, 16, 18] and possibility to apply deforming treatment without formation of cracks [20].

The presence of closed air cavities in the vessels provides soft hardwood with low thermal conductivity. Therefore, in order to reduce thermal conductivity in new wood thermal insulation materials, it is necessary to create a cellular structure with closed air layers.

A new thermal insulation material is a plywood cellular plate made of veneer (Fig. 1) [4, 8].



Fig. 1. Plywood cellular plate from an interline interval

Novelty of method and device for its manufacture are confirmed by russian patents [6, 7]. The inner layers of the plywood honeycomb plate consist of strips of

veneer laid with a gap so that each subsequent strip overlaps the gap between the previous layer. The presence of gaps between the veneer strips of the inner layers increases the thermal insulation properties and saves raw material. A hot press is used for gluing.

Plywood cellular plate is a new under-investigated material. There are no gluing modes and thermal characteristics are unknown. Therefore, dependencies are proposed to calculate the duration of gluing.

It is known that the duration of gluing of wood laminates of solid construction depends on the duration of heating of the glued bag to a temperature of 100 °C or higher. In its turn, duration of heating is determined by coefficient of thermal conductivity of glued material. The structure of existing wood laminates is uniform throughout the section. When such materials are heated, heat transfer occurs at a constant rate throughout the section, making the heat exchange stationary.

The processes of gluing uniform materials have been studied and described in sufficient detail in the scientific and reference literature, and the calculation of the gluing duration itself is not difficult. But in a plywood cellular plate containing internal air layers, the heat transfer process inside the stack is not constant due to the different heat conductivity coefficients of the wood and air. Therefore, the heat conductivity coefficient of materials with a non-uniform internal structure under non-stationary heat exchange conditions was calculated. The physical heating model of the stud pack is shown in Fig. 2.

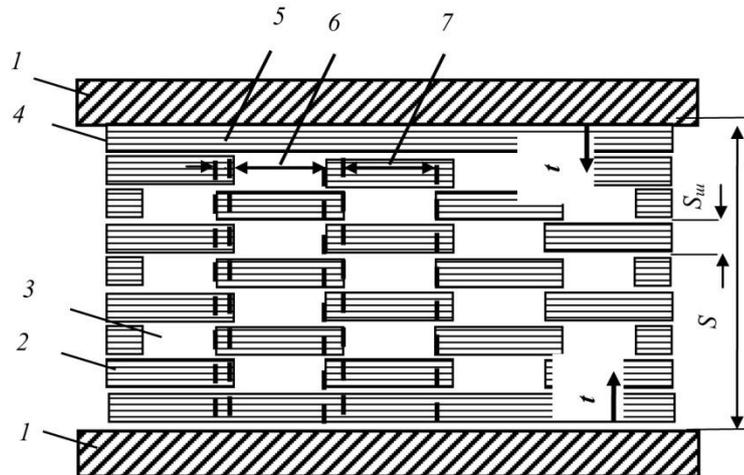


Fig. 2. Physical model of pack heating: 1 – press heating plates; 2 – spline strips; 3 – full-length sheet of the tongue; 4 – air layers; 5 – area without air layers; 6 – area with maximum number of air layers; 7 – section with air layers (S – thickness of package; S_m – thickness of veneer)

The cross section of the stud pack can be divided into solid sections without air layers 5 and sections with air layers 6 and 7 (Fig. 2). The duration of heating of the inner adhesive layer most distant from the press plate to 100 °C on each of the sections is calculated. First, we will calculate the area 7 containing the largest number of air layers. In this area, the package consists of n layers and k air layers and m wood layers. Number of layers n , pcs, will be determined

$$n = k + m = (m - 1) + m = 2m - 1. \quad (1)$$

Heating of a package of an interline interval is interfered by the thermal resistance of R , $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ which is determined by a formula

$$R = \frac{S}{\lambda}, \quad (2)$$

where S – thickness of a package, m ; λ – coefficient of heat conductivity of a package, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Total thermal resistance of the stud stack, R , $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$, is defined as the sum of the thermal resistances of the air layers and wood layers [9, 10]

$$R = k R_B + m R_d, \quad (3)$$

where R_B – thermal resistance of air, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; R_d – thermal wood resistance, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$.

From here

$$\frac{S}{\lambda} = k \frac{\delta_B}{\lambda_B} + m \frac{\delta_d}{\lambda_d}, \quad (4)$$

where δ_B и δ_d – Respectively thickness of air layer and wood layer, m .

Using the same-thickness stud $S_{\text{ш}}$

$$\delta_B = \delta_d = S_{\text{ш}}. \quad (5)$$

Considering (1–4)

$$\frac{(2m-1)S_{\text{ш}}}{\lambda} = \frac{(m-1)S_{\text{ш}}}{\lambda_B} + \frac{mS_{\text{ш}}}{\lambda_d}, \quad (6)$$

or

$$\frac{(2m-1)}{\lambda} = \frac{(m-1)}{\lambda_B} + \frac{m}{\lambda_d}. \quad (7)$$

Considering that the thermal conductivity coefficient λ numerically equal to product of thermal conductivity coefficient (α), density (ρ) и specific heat capacity (c) we obtain

$$\frac{2m-1}{\alpha_n \rho_n c_n} = \frac{m-1}{\alpha_B \rho_B c_B} + \frac{m}{\alpha_d \rho_d c_d} \quad (8)$$

where α_n , α_B and α_d – temperature conductivity factors of the stack, air and wood, respectively, m^2/s ; ρ_n , ρ_B and ρ_d – accordingly, the density of the stair pack, air and wood, kg/m^3 ; c_n , c_B and c_d – respectively specific heat of a package of an interline interval, air and wood, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Package density ρ_n , the kg/m^3 will make

$$\rho_n = [(m-1) \rho_B + m \rho_d] / (2m-1). \quad (9)$$

Similarly, we find the specific heat capacity of the stair pack

$$c_n = [(m-1) c_B + m c_d] / (2m-1). \quad (10)$$

From there

$$\alpha_n = (2m-1) / \{ [(m-1) / (\alpha_B \rho_B c_B) + m / (\alpha_d \rho_d c_d)] \rho_n c_B \}. \quad (11)$$

The temperature of the stud pack varies from 20 °C to 100 °C during heating. The values of the specific heat capacity of the stair pack and the coefficient of thermal conductivity are taken as arithmetic mean for simplification of calculations.

The value of specific heat capacity of wood depending on its humidity and temperature is selected according to [2, p. 145].

The specific heat of air will be 1.005 kJ/(kg·K), and at 100 °C 1.009 kJ/(kg·K). For calculations we accept $\alpha_b = 1.007$ kJ/(kg·K).

The coefficient of thermal diffusivity of air α_a at a temperature of 20 °C makes $20.8 \cdot 10^{-6}$ m²/s. The thermal diffusivity coefficient at a temperature of 100 °C makes $33.1 \cdot 10^{-6}$ m²/s. For calculations we accept as averaged $\alpha_a = 26.95 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Values of wood thermal conductivity coefficient are selected depending on wood temperature and humidity [2].

When moisture content is 15 %, the thermal conductivity factor of the wood α_d at temperature 20 °C is $1.51 \cdot 10^{-7}$ m²/s. In case of 15 % moisture, the coefficient of wood thermal conductivity at temperature of 100 °C is when moisture content is 15 %, the thermal conductivity factor of the wood α_d at temperature 100 °C makes $1.61 \cdot 10^{-7}$ m²/s. For calculations we accept $\alpha_b = 1.56 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

The calculation of the heating time of the stack is shown in Table.

Parameters of the package to be glued

Indicators	Wood	Air	Package
Density, kg/m ³	640	1,225	350
Coefficient of thermal conductivity, m ² /s	$1.56 \cdot 10^{-7}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$1.93 \cdot 10^{-6}$
Specific heat, kJ/(kg·K)	2.25	1.007	1.68

For a 22 mm thick stair pack in which there are 5 layers of wood and 2 layers of air in the 6 area (Fig. 5), with the thickness of each layer 2 mm, the density of the pack ρ_n , kg/m³ will make

$$\rho_n = [5 \cdot 1.225 + 6 \cdot 640] / 11 = 350.$$

Specific heat capacity of the stair pack c_n , kJ/(kg·K) will make

$$c_n = [5 \cdot 1.007 + 6 \cdot 2.25] / 11 = 1.68.$$

Thus, when gluing the plywood cellular plate, the coefficient of thermal conductivity of the pack of 11 layers of birch stew with a thickness of 0.002 m will be $\alpha_n = 1.93 \cdot 10^{-6}$ m²/s. We will calculate the gluing time of this packet. The most distant adhesive layer from the press plate is at a distance equal to half the thickness of the bag (0.011 m). The design ratio X/S will be

$$X/S = 0.011/0.022 = 0.5.$$

Reference temperature of a t_n package is 20 °C, the set temperature of heating of the press of a glue layer of t_3 , most remote from a plate, will be 100 °C, temperature of plates of a press of $t_{pl} = 110$ °C. Dimensionless temperature θ for the specified temperatures will be:

$$\theta = \frac{110 - 100}{110 - 20} = 0.11.$$

Fourier's criterion is chosen on the graphic dependences given [2] depending on value of dimensionless temperature θ and the relation of X/S . For $\theta = 0.11$ and $X/S = 0.5$ find Fourier criterion value

$$F_0 = 1.05.$$

Considering that duration of heating up to 100 °C the most distant from press plates adhesive layer t_1 , min, is determined by formula

$$\tau_1 = \frac{S^2 F_0}{4 \alpha_n}, \quad (12)$$

where S – thickness of packet to be glued, m; α_n – thermal conductivity coefficient of a package, m^2/s ; F_0 – fourier's criterion.

Duration of heating of the press of a glue layer, most remote from plates, to 100 °C, τ_1 , min, will be minutes:

$$\tau_1 = \frac{0.022^2 \cdot 1.05}{4 \cdot 0.000000156} = 814.4c = 13.6.$$

Taking into account gelation time at temperature 100 °C, τ_2 , minutes The total gluing time will be:

$$\tau_{\text{н}} = \tau_1 + \tau_2 = 13.6 + 0.9 = 14.5 \text{ minutes.}$$

The validity of the proposed dependencies has been confirmed experimentally. A 22 mm thick plywood mesh plate was glued from the birch peeled veneer at press plate temperature 110 °C and pressure exposure time 14.5 minutes.

Thermal characteristics of plywood cellular plate are determined. The value of the cellular plywood plate with density of 530 kg/m^3 thermal conductivity coefficient obtained by pre-6 dependencies was 0.082 W/(m·K). The experimental value of the thermal conductivity coefficient determined by the special device ITP-MG4 "100" according to GOST 7076–99 was 0.081 W/(m·K).

Good coincidence of theoretical and experimental data confirms the validity of the calculations. Thermal conductivity coefficient of cellular plywood plate with density is twice lower than that of conventional plywood plate. Strength at static bending of plywood cellular plate with thickness of 0.015 m parallel to fibers of external layers – 14 MPa, perpendicular to fibers – 10 MPa.

Conclusion

1. A physical model is developed for heating a package of layered material of a cellular structure from peeled veneer, and dependences are proposed for determining its thermal conductivity under conditions of unsteady heat transfer. It was found that for a package of 11 layers of birch veneer 2 mm thick, the thermal diffusivity is $1.93 \cdot 10^{-6} m^2/s$.

2. Based on the fundamental theory of wood thermal conductivity, dependencies are obtained for calculating the duration of bonding of heat-insulating materials of a cellular structure. It has been established that the duration of gluing of a 22 mm thick plywood mesh slab of peeled birch veneer under pressure exposure is 14.5 minutes at a temperature of press plates 110 °C.

3. The thermotechnical characteristics of the new wood-based material with a cellular structure were determined: the thermal conductivity coefficient of a cellular plywood board with a density of 530 kg/m^3 was 0.081 W/(m·K), the strength under static bending of the board parallel to the fibers of the outer layers was 14 MPa, and perpendicular to the fibers was 10 MPa.

4. The use of poorly used deciduous wood with low operational properties as a heat-insulating material, where high strength indicators are not required, is

justified, since its thermal conductivity is two times lower than that of a similar material – solid plywood board.

REFERENCES

1. Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Handbook of Wood*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1989. 296 p. (In Russ.)
2. Krechetov I.V. *Wood Drying*. Moscow, Briz Publ., 1997. 500 p. (In Russ.)
3. Levinskiy Yu.B., Rasev A.I., Kosarin A.A., Krasukhina L.P. *Wooden House Construction*. Saint Petersburg, Strategiya budushchego Publ., 2008. 303 p. (In Russ.)
4. Lukash A.A., Plotnikov V.V., Savenko V.G., Bogatovskiy M.V. New Construction Materials – Relief Plywood and Cellular Plywood Board. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials], 2006, no. 12, pp. 38–39. (In Russ.)
5. Lukichev A.V. Prospects of Wood Frame House Construction in Russia. *Stroitel'nye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Construction materials, the equipment, technologies of XXI century], 2008, no. 11(118), pp. 44–45. (In Russ.)
6. Savenko V.G., Lukash A.A. *Laminated-Wood Material*. Patent RF, no. 2252865, 2005. (In Russ.)
7. Lukash A.A. *Former of Assembly Line of Stacks of Wood Laminated Material*. Patent RF, no. 2298469, 2007. (In Russ.)
8. Savenko V.G., Lukash A.A., Shkil' K.K. Cellular Plywood Board. *Derevoobrabatival'naya promishlennost'* [Woodworking industry], 2006, no. 6, pp. 14–15. (In Russ.)
9. *SNiP 23-02-2003. Thermal Performance of the Buildings*. Adopted by the Resolution of the State Committee for Construction of the Russian Federation on June 26, 2003 No. 113. Moscow, NIISF RAASN Publ., 2003. 36 p. (In Russ.)
10. *SP 23-101-2004. Thermal Performance Design of Buildings*. Brought into Force on June 1, 2004. Moscow, NIISF Publ., 2004. 122 p. (In Russ.)
11. *Strategy of Development of Forest Complex of the Russian Federation for the Period up to 2020*. Approved by the Order of the Ministry of Industry and Trade and the Ministry of Agriculture on October 31, 2008, No. 248/482. (In Russ.)
12. Ugolev B.N. *Wood Science with the Basics of Forest Merchandizing*: Educational Textbook. Moscow, MSFU Publ., 2007. 340 p. (In Russ.)
13. Gaff M., Gašparík M., Matlák J. 3D Molding of Veneers by Mechanical Means. *BioResources*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 412–422.
14. Goli G., Cremonini C., Negro F., Zanuttini R., Fioravanti M. Physical-Mechanical Properties and Bonding Quality of Heat Treated Poplar (I-214 Clone) and Ceiba Plywood. *iForest*, 2014, vol. 8, iss. 5, pp. 687–692. DOI: [10.3832/ifor1276-007](https://doi.org/10.3832/ifor1276-007)
15. Gu H., Zink-Sharp A., Sell J. Hypothesis on the Role of Cell Wall Structure in Differential Transverse Shrinkage of Wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2001, vol. 59, iss. 6, pp. 436–442. DOI: [10.1007/s001070100240](https://doi.org/10.1007/s001070100240)
16. Joffre T., Isaksson P., Dumont P.J.J., Rolland du Roscoat S., Sticks S., Orgéas L., Gamstedt E.K. A Method to Measure Moisture Induced Swelling Properties of a Single Wood Cell. *Experimental Mechanics*, 2016, vol. 56, iss. 5, pp. 723–733. DOI: [10.1007/s11340-015-0119-9](https://doi.org/10.1007/s11340-015-0119-9)
17. Nikulshin S., Semishkur S., Tambi A., Chubinsky A. Strength of Spruce Wood. *Internationale Studierenkonferenz "SPRUNGBRETT"*, Center for Development and Cooperation CDC, Berner Fachhochschule. Biel, Schweiz, 2015, vol. 0, pp. 133–138.
18. Pan Y., Zhong Z. Micromechanical Modeling of the Wood Cell Wall Considering Moisture Absorption. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 91, pp. 27–35. DOI: [10.1016/j.compositesb.2015.12.038](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.038)
19. Wu G.-F., Lang Q., Qu P., Jiang Y.-F., Pu J. Effect of Chemical Modification and Hot-Press Drying on Poplar Wood. *BioResources*, 2010, vol. 5, iss. 4, pp. 2581–2590.
20. Zamilova A.F., Galikhanov M.F., Safin R.R., Ziatdinov R.R., Mikryukova Y.K. Change of the Properties of Plywood during the Thermomodification of Veneer and the Po-

larization of the Glue. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1886, iss. 1, art. 020053. DOI: [10.1063/1.5002950](https://doi.org/10.1063/1.5002950)

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯЧЕЙСТОЙ КОНСТРУКЦИИ

А.А. Лукаш, канд. техн. наук, доц.

Н.П. Лукутцова, д-р техн. наук, проф.

Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Ст. Дмитрова, д. 3а, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: mr.luckasch@yandex.ru, natluk58@mail.ru

Разработана физическая модель нагрева пакета слоистого материала ячеистой конструкции из лущеного шпона, предложены зависимости для определения его теплопроводности в условиях нестационарного теплообмена. Установлено, что для пакета из 11 слоев березового шпона толщиной 2 мм коэффициент температуропроводности составляет $1,93 \cdot 10^{-6}$ м²/с. На основе фундаментальной теории теплопроводности древесины получены зависимости для расчета продолжительности склеивания теплоизоляционных материалов ячеистой конструкции. Доказано, что продолжительность склеивания фанерной ячеистой плиты толщиной 22 мм из березового лущеного шпона под давлением составляет 14,5 мин при температуре плит пресса 110 °С. Определены теплотехнические характеристики нового древесного материала ячеистой конструкции: коэффициент теплопроводности ячеистой фанерной плиты плотностью 530 кг/м³ – 0,081 Вт/(м·К), прочность при статическом изгибе плиты параллельно волокнам наружных слоев – 14 МПа, перпендикулярно волокнам – 10 МПа. Обосновано применение мало используемой древесины мягких лиственных пород с низкими эксплуатационными свойствами в качестве теплоизоляционного материала там, где не требуются высокие прочностные показатели, так как ее коэффициент теплопроводности в 2 раза ниже, чем у аналогичного материала – сплошной фанерной плиты.

Для цитирования: Lukash A.A., Lukutsova N.P. Thermal Conductivity of Wood-Based Cellular Structures // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 146–153. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-146-153

Ключевые слова: плита фанерная ячеистая, древесина мягких лиственных пород, теплопроводность, шпон, склеивание, теплообмен.

Поступила 03.06.19 / Received on June 3, 2019

УДК 674.047.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

*А.Г. Гороховский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6030-2018](#),
ORCID: [0000-0001-8847-8217](#)*

*В.В. Побединский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [G-3245-2018](#),
ORCID: [0000-0001-6318-3447](#)*

*Е.Е. Шишкина, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [O-6021-2018](#),
ORCID: [0000-0002-2584-4897](#)*

*Е.В. Побединский, аспирант; ResearcherID: [R-2080-2018](#),
ORCID: [0000-0003-1838-309X](#)*

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail pobed@el.ru

Рассмотрена проблема сушки пиломатериалов. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования системы автоматизированного управления технологическим процессом сушки пиломатериалов на базе современных информационных технологий, снижения энергоемкости этих технологий, что закреплено в программных документах развития лесной отрасли на правительственном уровне. Функциональным назначением системы автоматизированного управления является обеспечение заданного уровня влажности древесины при ее необходимом качестве (исключение повреждений). Получить такую функциональную зависимость от температуры нагрева в камере и равновесной влажности воздуха традиционными статистическими методами чрезвычайно сложно из-за условий неопределенности параметров, поэтому следует использовать аппарат теории нечетких множеств. Цель исследований заключалась в получении функциональных зависимостей влажности пиломатериалов и времени сушки от температуры нагрева и равновесной влажности воздуха в сушильной камере на основе нечеткого вывода. Методологическую основу теоретических исследований составили: теория сушки, положения математического и нечеткого моделирования, а в части проверки адекватности предложенной нечеткой модели – методы математической статистики и теории эксперимента. Результатами исследований являются полученные зависимости влажности пиломатериалов и времени сушки от температуры нагрева и равновесной влажности воздуха в сушильной камере, синтез которых выполнен средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB. Предложенные функции влажности и времени сушки пиломатериалов учитывают основные параметры процесса (температуру нагрева и равновесную влажность воздуха) и экспериментально проверены на адекватность. Практическая применимость результатов заключается в возможности создания интеллектуальной системы автоматического управления процессом сушки пиломатериалов.

Для цитирования: Гороховский А.Г., Побединский В.В., Шишкина Е.Е., Побединский Е.В. Моделирование процесса сушки пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 154–166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166

Ключевые слова: сушка древесины, влажность древесины, равновесная влажность воздуха, нечеткое моделирование, нечеткий вывод.

Введение

Задача повышения энергетической эффективности была и остается актуальной для лесной отрасли страны. На необходимость стимулирования ме-

роприятий по внедрению энергоэффективных технологий прямо указывается как на одну из глобальных задач в ряде правительственных документов, например в [8].

К наиболее энергоемким следует отнести процессы, связанные с длительным нагревом больших объемов сырья, – сушку пиломатериалов. При этом в современном деревообрабатывающем производстве она является важнейшей операцией, без правильного выполнения которой невозможно обеспечить необходимое качество изделий из древесины. Сложность заключается еще и в том, что ни одна из операций не вызывает таких значительных изменений свойств древесины, как ее сушка, что делает процесс управления сушильными камерами крайне нестабильным. Непосредственно сама древесина – исключительно сложный материал ортотропного, анизотропного строения, неоднородной структуры в зависимости от породы и направления по сечению. По этим причинам рабочие объемы пиломатериалов, загружаемые в сушильные камеры, не могут иметь одинаковых характеристик, т. е. предварительно установленные режимы, как правило, нуждаются в оперативной коррекции или адаптивном управлении на протяжении всего процесса сушки. Эти режимы обусловлены характеристиками пиломатериалов и оборудования: породой, геометрическими параметрами, районом произрастания, плотностью древесины, местом вырезки из ствола, содержанием влаги, температурой, аэродинамикой, тепловым оборудованием сушильной камеры и др. По причине многообразия условий и влияющих факторов в сушильном оборудовании наиболее сложной частью считается управление технологическим процессом. В настоящее время продолжают работы по совершенствованию системы автоматического регулирования сушильных камер [41, 46, 56]. Процессам моделирования посвящены работы [5, 6, 12, 16, 17], но в полной мере проблема остается нерешенной. Также получены недостаточно удовлетворительные результаты авторами исследований [2, 3, 7, 13, 15]. Основной причиной такого положения является нестабильность исходных данных [2, 14], с математической точки зрения теории нечетких множеств (ТНМ) это можно отнести к свойству неопределенности данных.

Обзор исследований по теме сушки древесины следует дополнить публикациями зарубежных авторов, в которых освещаются различные аспекты этого процесса. Например, сушка с учетом деформаций [55], моделирование тепло- и массопереноса [45], оценка качества суши по различным стандартам [39], при различных экспериментальных исследованиях [23], осциллирующая вакуумно-кондуктивная сушка [42], сушка с использованием моделей диффузии влаги [22, 33], с оценкой механических свойств древесины [35, 36]. Известны работы по вакуумной [24] и СВЧ-сушке [27, 37] древесины.

Необходимо отметить новую тенденцию в научных исследованиях – применение ТНМ для изучения и разработки автоматического управления сушильным оборудованием [41], нечеткого контроллера [46].

В отечественных [1, 4, 9, 40] и зарубежных изданиях [20, 25–31, 34, 39, 40, 43, 44, 49–54] широко представлена тема применения ТНМ в задачах моделирования различных процессов. В области нечеткого моделирования как в России, так и за рубежом наблюдается большая публикационная активность. Известны работы, раскрывающие развитие математического аппарата учета различных аспектов неопределенности [20, 28, 43, 54], а также многие прикладные исследования по разным техническим [19, 21, 28] и гуманитарным

[18, 32, 50] направлениям, в юриспруденции [38], экономике [51], медицинских науках [26, 31, 34].

На основании обзора научной информации можно сделать следующие выводы.

1. Результаты известных исследований не позволяют в полной мере решить проблему автоматического управления процессом сушки древесины, в первую очередь из-за неопределенностей в данных технологического процесса.

2. Вопросы исследования процессов сушки пиломатериалов на основе нечеткого моделирования ранее не рассматривались.

3. Для практической реализации нечетких моделей в основном используется система компьютерной математики MATLAB [30, 45], которая располагает средствами для этой цели – приложением Fuzzy Logic Toolbox.

Кроме того, при дальнейшем совершенствовании технологии сушки древесины нужно учесть еще одну задачу – сложность моделирования многопараметрического процесса. Следует отметить, что почти все параметры процесса управления сушкой пиломатериалов характеризуются свойствами неопределенности. Современные достижения математики, информационных технологий, теории автоматического управления содержат аппарат для создания совершенной системы интеллектуального автоматического регулирования процесса сушки, но разработки в этом направлении остаются вне поля зрения ученых. Соответственно – в исследованиях по данной теме необходимо учитывать следующие особенности.

Известно, что целью любого процесса сушки является обеспечение заданного уровня влажности древесины с наименьшими энергозатратами и необходимым качеством (исключение ее повреждений). К наиболее значимым управляющим параметрам процесса относятся температура и равновесная влажность воздуха в сушильной камере. Последняя может изменяться за счет организации воздухообмена. С точки зрения автоматического регулирования нужно получить функцию влажности древесины от температуры прогрева и равновесной влажности воздуха в камере. Влажность древесины зависит от многих факторов, которые в ранее проводимых исследованиях характеризовались статистическими параметрами. Однако реальные параметры в большей степени характеризуются свойствами неопределенности. В таких условиях получить функцию влажности древесины в зависимости от множества параметров статистическими методами, требующими огромного объема статистических и экспериментальных данных, не представляется возможным. Для подобных условий используется аппарат ТНМ и его приложение – нечеткое моделирование, которое показало свою эффективность в решении широкого класса задач во многих отраслях науки и производства. По рассматриваемой теме ранее были получены обширные экспериментальные результаты [2, 4, 15], на них и базируется настоящее исследование, но для вывода модели влажности известных статистических данных будет недостаточно. Обзор некоторых зарубежных исследований [18–21, 26–28, 30, 42, 47, 48, 52, 53, 55, 56] показал аналогичную картину, результаты для практического применения в системах интеллектуального управления отсутствуют.

На основании обзора публикаций и специфических особенностей процесса определились задачи настоящих исследований, итогом которых была разработка одной из моделей интеллектуальной системы управления процессом сушки пиломатериалов:

выполнение содержательной постановки задачи сушки пиломатериалов на основе нечеткого моделирования;
 определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости);
 разработка базы правил нечеткой продукции;
 синтез нечеткой модели зависимостей влажности и времени сушки от входных параметров средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB.

Объекты и методы исследования

Методологическую основу теоретических исследований составили положения теории сушки древесины, математического и нечеткого моделирования, а в части выполнения экспериментальных исследований по проверке адекватности предложенной нечеткой модели – методы математической статистики и теории эксперимента.

Разработка нечеткого вывода функций выполнялась по известной методике [1, 4, 40] в последовательности, приведенной ниже. Эта методика также использовалась авторами для решения других задач [9–11].

Выполнение содержательной постановки задач моделирования влажности и времени сушки пиломатериалов. В соответствии с известными методиками [1, 4, 40] формализация задачи начинается с описания данных об основных параметрах объекта в форме эвристических правил, моделирующих процесс сушки древесины. В данном случае рассматривается изменение влажности и времени сушки в зависимости от различных сочетаний основных влияющих параметров. В содержательном описании задачи определены наиболее специфические особенности процесса. Одновременно с этой процедурой выполняется формирование базы правил системы нечеткого вывода. Процесс зависит от многих факторов, но рассмотрим главные параметры, которыми управляется технологический процесс конвективной сушки, – текущая влажность и время сушки пиломатериалов. Предположим, что характеристики породы, геометрические размеры сырья, сушильной камеры и другие влияющие параметры закреплены на одном уровне. Известные [2] ориентировочные режимы процесса сушки условного пиломатериала с учетом равновесной влажности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы сушки условного пиломатериала

Номер ступени	Температура t , °C	Равновесная влажность u , %	Влажность древесины W , %	Время сушки T , ч
1	69	14,5	60...40	39
2	71	12,5	40...35	52 (+13)
3	73	11,0	35...30	67 (+15)
4	75	9,5	30...25	84 (+17)
5	77	7,5	25...20	105 (+21)
6	79	6,5	20...15	132 (+27)
7	81	5,5	15...10	170 (+38)
8	83	4,0	10...8	192 (+22)

Процесс сушки является сильно нелинейным, поэтому для анализа он разделен на 8 ступеней. Влажность древесины обратно пропорциональна тем-

пературе и равновесной влажности воздуха. Время сушки в диапазоне влажности 60...40 % самое продолжительное и для условного пиломатериала составляет 39 ч. Далее влажность снижается, но в сравнении со следующими степенями это объясняется изменением влажности только на 5 %. Относительно влажности самое продолжительное время сушки на ступени 8, где время сушки для обеспечения снижения влажности на 2 % составляет 22 ч.

Для дальнейшей постановки задачи необходимо определить нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

Определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости). Определим значения входных величин. Температура t в камере конвекционного типа для условного пиломатериала задается на протяжении всех ступеней (1–8) в диапазоне 69...83 °С. Равновесная влажность u согласно экспериментальным исследованиям [2] принимает значения от 4,0 до 12,5 %. Выходными величинами являются влажность W и время сушки пиломатериалов T .

Сушка в настоящей задаче начинается от влажности 60 % и заканчивается при 8 %. Время сушки необходимо рассматривать только как ориентировочное и только для условного пиломатериала. С учетом физических значений величин следует определить лингвистические переменные задачи.

На универсуме нечетких множеств в данном случае будет целесообразно принять 5 значений входных и выходных лингвистических переменных. Термножества значений лингвистических переменных представлены треугольными нечеткими числами, а на границах области определения – сигмоидальными нечеткими интервалами. Для термножества «Большая» переменной «Равновесная влажность» принято трапецеидальное нечеткое число, по причине увеличенного диапазона значений в этой области. В графическом виде лингвистические переменные приведены на рис. 1.

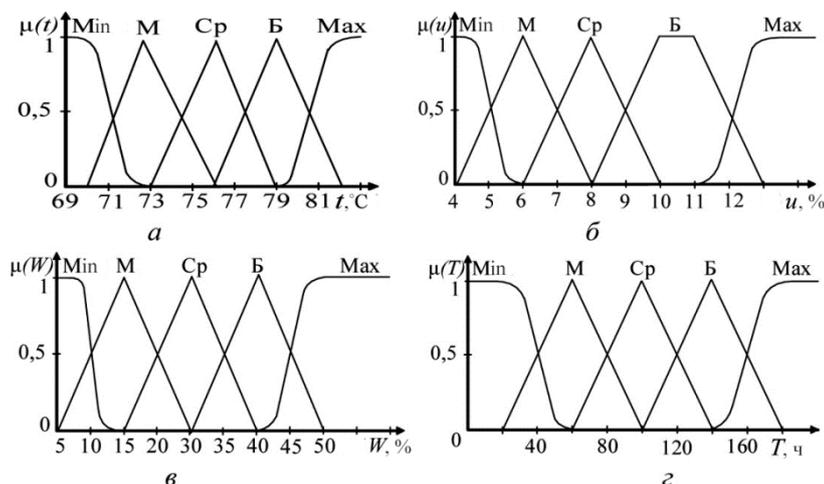


Рис. 1. Нечеткие функции принадлежности лингвистических переменных для вывода функций $W = f(t, u)$ и $T = f(t, u)$: а – «Температура t »; б – «Равновесная влажность u »; в – «Влажность W »; г – «Время T »

Fig. 1. Fuzzy membership functions of linguistic variables for the derivation of the function $W = f(t, u)$ and $T = f(t, u)$: а – “Temperature t ”; б – “Equilibrium humidity u ”; в – “Humidity W ”; г – “Time T ”

В качестве обозначений лингвистических переменных для предложенных функций приняты: «Минимальная» – Min; «Малая» – M; «Средняя» – Cp; «Большая» – B; «Максимальная» – Max.

В терминах ТНМ лингвистические переменные определены термножествами со следующими значениями: «Температура t » {Min, M, Cp, B, Max}; «Равновесная влажность u » {Min, M, Cp, B, Max}; «Влажность W » {Min, M, Cp, B, Max}; «Время T » {Min, M, Cp, B, Max}.

Формирование базы правил системы нечеткого вывода. Для нечеткого вывода функции принадлежности используем один из наиболее распространенных методов – метод Мамдани [4, 40]. Применение данного метода предполагает разработку базы правил нечеткой продукции. При этом влияние сочетаний входных воздействий на выходной параметр записывается в следующей форме:

если $t =$ «Минимальная» и $u =$ «Минимальная», то $W =$ «Минимальная» и $T =$ «Среднее».

Далее рассматривается описание вариантов сочетаний входных параметров (t и u) с использованием большого количества значений лингвистических переменных: «Средняя», «Большая», «Малая». С учетом специфических особенностей явления формализуется база правил нечеткого вывода функции, которая в полном объеме приведена в табл. 2.

Таблица 2

Состав базы правил нечеткой продукции для моделирования влажности пиломатериалов $W = f(t, u)$

Лингвистическая переменная «Температура t »	Выходные нечеткие подмножества «Влажность W » при изменении нечеткой функции «Равновесная влажность u »				
	Min	M	Cp	B	Max
Min	Max	Max	Max	Max	Max
M	B	B	Max	Max	Max
Cp	Cp	B	B	Max	Max
B	M	Cp	B	B	Max
Max	Min	M	Cp	B	Max

Аналогично получаем базу правил для вывода функции времени сушки (табл. 3).

Таблица 3

Состав базы правил нечеткой продукции для моделирования времени сушки пиломатериалов $T = f(t, u)$

Лингвистическая переменная «Температура t »	Выходные нечеткие подмножества «Время T » при изменении нечеткой функции «Равновесная влажность u »				
	Min	M	Cp	B	Max
Min	Cp	B	B	Max	Max
M	Cp	Cp	Cp	Max	Max
Cp	M	Cp	Cp	B	Max
B	Min	M	M	Cp	B
Max	Min	Min	M	Cp	B

Нечеткий вывод результирующей функции выполнен по методу Мамдани [4, 40]. Схема вывода в формате MATLAB приведена на рис. 2.

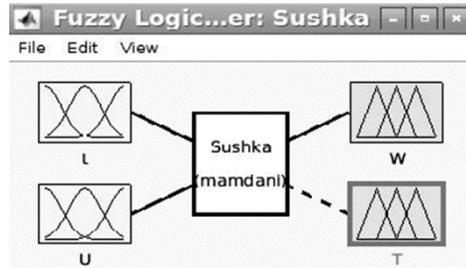


Рис. 2. Схема нечеткого вывода в среде MATLAB [30]

Fig. 2. Scheme of fuzzy inference in the MATLAB environment [30]

Результаты исследования и их обсуждение

Синтез нечетких моделей режимов сушки пиломатериалов. Формальная постановка задачи нечеткого вывода реализована в компьютерной программе Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab [30]. Процедура вывода показана на рис. 3.

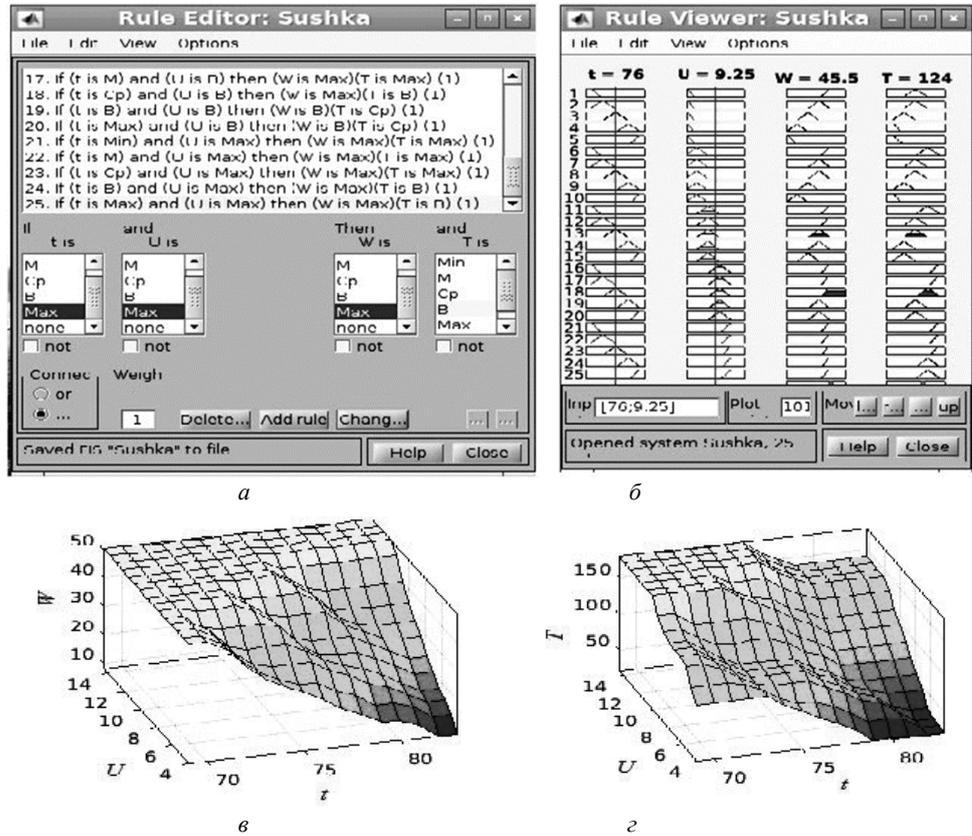


Рис. 3. Нечеткий вывод функций $W = f(t, u)$ и $T = f(t, u)$ в среде Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB: *a* – база правил нечеткого вывода; *b* – процедура нечеткого вывода и приведения к четкости; *в* – функция нечеткого вывода «Влажность W »; *г* – функция нечеткого вывода «Время T »

Fig. 3. Fuzzy inference of the function $W = f(t, u)$ and $T = f(t, u)$ in the Fuzzy Logic Toolbox environment of the MATLAB application: *a* – base of rules of fuzzy inference; *b* – procedure of fuzzy inference and reduction to clarity; *в* – fuzzy inference function of the “Humidity W ”; *г* – fuzzy inference function of the “Time T ”

В данном случае использовался алгоритм по известной методике [4, 40]:

1. фаззификация (введение нечеткости);
2. формирование базы правил нечеткой продукции (рис. 3, а);
3. получение нечеткого вывода (рис. 3, б);
4. дефаззификация (приведение к четкости) (рис. 3, в);
5. получение конечной функции нечеткого вывода (рис. 3, г, з).

Найденные в результате нечеткого вывода функции являются достаточно корректными математически и могут использоваться для прогнозирования влажности и времени сушки пиломатериалов. Сравнение с экспериментальными данными [2] показывает достаточную их адекватность.

Результаты исследования сравниваются с существующими с анализом их соответствия следующим критериям научной ценности: отличие от известных результатов; научная новизна; практическая применимость.

Главное отличие состоит в том, что, как было показано, достаточно полноценных исследований, посвященных нечеткому моделированию процессов сушки древесины в целях разработки систем автоматического управления этим процессом на нечеткой логике, ни в России, ни за рубежом не проводилось.

Условия неопределенности в исходных параметрах процесса сушки приводят к ситуациям, когда традиционные методы неэффективны из-за отсутствия достоверных знаний об объекте управления. Предложенный подход и полученные результаты в отличие от существующих методов позволяют решить эту проблему применительно к процессу сушки пиломатериалов.

Научная новизна следует из отличительных особенностей наших результатов, т. е. впервые предложен теоретический подход к оценке влажности и времени сушки пиломатериалов на основе нечеткого моделирования. Другим элементом научной новизны являются установленные зависимости влажности и времени сушки пиломатериалов от температуры и равновесной влажности воздуха в сушильной камере. Адекватность полученных зависимостей находит подтверждение в результатах экспериментальных исследований [2].

Практическая применимость результатов заключается в возможности создания системы автоматического управления процессом сушки пиломатериалов. Результаты в виде функциональной зависимости, полученной на основе нечеткого вывода, необходимы для разработки нечеткого контроллера управления сушильной камерой.

Выводы

1. В настоящее время совершенствование методов исследований параметров сушки древесины невозможно без применения интеллектуальных программных систем и компьютерных средств. Предложенная постановка задачи нечеткого моделирования и реализация соответствующего программного обеспечения в среде MATLAB позволяют эффективно использовать информационные технологии в исследованиях, моделировании и совершенствовании сушильных камер.

2. Разработка модели оценки влажности пиломатериалов с привлечением статистических методов является чрезвычайно трудоемкой и недостаточно корректной. Для условий такого класса задач в наибольшей мере подходит аппарат нечетких множеств.

3. Предлагаемые функции влажности и времени сушки пиломатериалов, построенные на основе нечеткого вывода, учитывают основные параметры процесса (температуру в камере, равновесную влажность воздуха), а сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [6, 14] показывает достаточную адекватность разработанной модели и позволяет реализовать принципиально новый подход к решению проблемы совершенствования сушильного оборудования, повышения качества пиломатериалов и снижения энергоемкости процессов в этой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 393 с. [Vasil'yev V.I., Il'yasov B.G. *Intelligent Control Systems. Theory and Practice*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 393 p.]
2. Гороховский А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 290 с. [Gorokhovskiy A.G. *Sawn Timber Drying Technology Based on Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes in Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2008. 290 p.]
3. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Чернышев О.Н. Оптимальное управление процессами тепломассообмена при конвективной сушке древесины // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. [Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Chernyshev O.N. Optimum Control of Processes of Thermo-Mass Transfer at Convection to Wood Drying. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6].
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с. [Leonenkov A.V. *Fuzzy Modeling in the Environment of MATLAB and FuzzyTECH*. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005. 736 p.]
5. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с. [Lykov A.V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 470 p.]
6. Лыков А.В. О системах дифференциальных уравнений тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах // Инж.-физ. журн. 1974. Т. XXVI. № 1. С. 18–25. [Lykov A.V. On Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1974, vol. XXVI, no. 1, pp. 18–25].
7. Никитенко Н.И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток. Киев: Наук. думка, 1971. 266 с. [Nikitenko N.I. *Investigation of Non-Stationary Processes of Heat and Mass Exchange by the Grid Method*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971. 266 p.]
8. Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ № 1724-р от 26 сент. 2013 г. [Decree of the Government of the Russian Federation of September 26, 2013 No. 1724-r "Fundamentals of State Policy in the Field of Use, Protection and Reproduction of Forests in the Russian Federation for the Period up to 2030].
9. Побединский В.В., Газизов А.М., Санников С.П., Побединский А.А. Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге // Вестн. Мордов. ун-та. 2018. Т. 28, № 2. С. 148–163. [Pobedinsky V.V., Gazizov A.M., Sannikov S.P., Pobedinskiy A.A. Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio-Frequency Monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 148–163]. DOI: [10.15507/0236-2910.028.201802.148-163](https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163)
10. Санников С.П., Побединский В.В., Бородулин И.В., Черницын М.А., Кузьминов Н.С. Зависимость падения мощности сигнала при радиочастотном мониторинге лесного фонда от конструктивных параметров // Измерение. Мониторинг.

Управление. Контроль. 2016. № 3(17). С. 23–29. [Sannikov S.P., Pobedinskiy V.V., Borodulin I.V., Chernitsyn M.A., Kuz'minov N.S. The Dependence of the Fall of the Signal Power on the Parameters of the Forest Environment when the Radio Frequency of Forest Monitoring. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control], 2016, no. 3(17), pp. 23–29].

11. Санников С.П., Побединский В.В., Газизов А.М., Бородулин И.В., Черницын М.А., Кузьминов Н.С. Зависимость падения мощности сигнала от параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге лесного фонда // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4(32). С. 181–187. [Sannikov S.P., Pobedinsky V.V., Gazizov A.M., Borodulin I.V., Chernitsyn M.A., Kuzminov N.S. Dependence of the Signal Power Loss on the Forest Ambience Parameters Under Radio-Frequency Monitoring of Forest Fund. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [System. Methods. Technologies], 2016, no. 4(32), pp. 181–187].

12. Смирнов М.С. О системе дифференциальных уравнений процесса сушки // Инж.-физ. журн. 1961. Т. IV, № 9. С. 40–44. [Smirnov M.S. On the System of Differential Equations of the Drying Process. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1961, vol. IV, no. 9, pp. 40–44].

13. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с. [Tsoy P.V. *Methods for Heat and Mass Transfer Problem Solving*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 416 p.].

14. Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2016. 336 с. [Shishkina E.E. *Energy-Saving Technology for Convective Drying of Sawn Timber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2016. 336 p.].

15. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины (вопросы теории, методы расчета процессов, совершенствование технологии): дис. ... д-ра техн. наук. М., 1985. 381 с. [Shubin G.S. *Drying and Heat Treatment of Wood (Issues of Theory, Methods for Process Calculation, Technology Improvement)*: Dr. Eng. Sci. Diss. Moscow, M, 1985. 381 p.].

16. Шубин Г.С. Обобщенная система уравнений тепломассопереноса при переменных условиях среды и ее реализация на ЭВМ для расчета процессов сушки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 1988. № 3. С. 49–56. [Shubin G.S. Generalized System of Heat and Mass Transfer Equations under Variable Environmental Conditions and Its Implementation on a Computer for Calculating the Drying Processes of Wood. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1988, no. 3, pp. 49–56.]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1988/%E2%84%96%203.pdf>

17. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 336 с. [Shubin G.S. *Drying and Heat Treatment of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 336 p.].

18. Alguliyev R., Abdullayeva F. Development of Fuzzy Risk Calculation Method for a Dynamic Federation of Clouds. *Intelligent Information Management*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 230–241. DOI: [10.4236/iim.2015.74018](https://doi.org/10.4236/iim.2015.74018)

19. Ali A., El-Serafi K., Mostafa S.A.K., El-Sheimy N. Frequency Features Based Fuzzy System for Rotating Machinery Vibration Analysis Using Smartphones Low-Cost MEMS Sensors. *Journal of Sensor Technology*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 56–74. DOI: [10.4236/jst.2016.63005](https://doi.org/10.4236/jst.2016.63005)

20. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: [10.1007/s00107-017-1212-9](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1212-9)

21. Carneiro A.L.G., Porto Jr. A.C.S. An Integrated Approach for Process Control Valves Diagnosis Using Fuzzy Logic. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 148–157. DOI: [10.4236/wjnst.2014.43019](https://doi.org/10.4236/wjnst.2014.43019)

22. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. *Wood Science and Technology*, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: [10.1007/s00226-010-0391-x](https://doi.org/10.1007/s00226-010-0391-x)

23. Da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M.F. One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, iss. 4, pp. 364–371. DOI: [10.1007/s10086-015-1479-6](https://doi.org/10.1007/s10086-015-1479-6)
24. Espinoza O., Bond B. Vacuum Drying of Wood – State of the Art. *Current Forestry Reports*, 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 223–235. DOI: [10.1007/s40725-016-0045-9](https://doi.org/10.1007/s40725-016-0045-9)
25. Garg H. A Linear Programming Method Based on an Improved Score Function for Interval-Valued Pythagorean Fuzzy Numbers and Its Application to Decision-Making. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 67–80. DOI: [10.1142/S0218488518500046](https://doi.org/10.1142/S0218488518500046)
26. Gour A., Pardasani K.R. Statistical and Soft Fuzzy Set Based Analysis of Amino Acid Association Patterns in Peptide Sequence of Swine Influenza Virus. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 137–144. DOI: [10.1166/asem.2018.2118](https://doi.org/10.1166/asem.2018.2118)
27. Jia X., Hayashi K., Zhan J., Cai Y. The Moisture Transfer Mechanism and Influencing Factors in Wood during Radio-Frequency/Vacuum Drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, vol. 74, iss. 2, pp. 203–210. DOI: [10.1007/s00107-015-0985-y](https://doi.org/10.1007/s00107-015-0985-y)
28. Lin J.-J., Chuang C.-J., Ko C.-F. Applying GA and Fuzzy Logic to Breakdown Diagnosis for Spinning Process. *Intelligent Information Management*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 21–38. DOI: [10.4236/iim.2017.91002](https://doi.org/10.4236/iim.2017.91002)
29. Mamdani E.H. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 1977, vol. 26, no. 12, pp. 1182–1191. DOI: [10.1109/TC.1977.1674779](https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779)
30. MATLAB Release Notes for R2008a. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/release-notes.Highlight> (accessed 15.02.19).
31. Miranda G.H.B., Felipe J.C. Computer-Aided Diagnosis System Based on Fuzzy Logic for Breast Cancer Categorization. *Computers in Biology and Medicine*, 2015, vol. 64, pp. 334–346. DOI: [10.1016/j.combiomed.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.10.006)
32. Moises S.A., Pereira S. do L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 12–18. DOI: [10.4236/jdaip.2014.21003](https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003)
33. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics. *Drying Technology*, 2018, vol. 36, iss. 15, pp. 1920–1929. DOI: [10.1080/07373937.2018.1463538](https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1463538)
34. Ntaganda J.M., Hagggar M.S.D., Mampassi B. Fuzzy Logic Strategy for Solving an Optimal Control Problem of Therapeutic Hepatitis C Virus Dynamics. *Open Journal of Applied Sciences*, 2015, vol. 5, no. 9, pp. 527–541. DOI: [10.4236/ojapps.2015.59051](https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.59051)
35. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. *Wood Science and Technology*, 2017, vol. 51, iss. 4, pp. 739–749. DOI: [10.1007/s00226-017-0918-5](https://doi.org/10.1007/s00226-017-0918-5)
36. Ouertani S., Koubaa A., Azzouz S., Hassini L., Dhib K.B., Belghith A. Vacuum Contact Drying Kinetics of Jack Pine Wood and Its Influence on Mechanical Properties: Industrial Applications. *Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 51, iss. 7, pp. 1029–1039. DOI: [10.1007/s00231-014-1476-0](https://doi.org/10.1007/s00231-014-1476-0)
37. Ouertani S., Koubaa A., Soufien A., Rim B., Lamine H., Belghith A. Microwave Drying Kinetics of Jack Pine Wood: Determination of Phytosanitary Efficacy, Energy Consumption, and Mechanical Properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, iss. 4, pp. 1101–1111. DOI: [10.1007/s00107-018-1316-x](https://doi.org/10.1007/s00107-018-1316-x)
38. Perez O. Fuzzy Law: A Theory of Quasi-Legal Systems. *Canadian Journal of Law & Jurisprudence*, 2015, vol. 28, iss. 2, pp. 343–370. DOI: [10.1017/cjlj.2015.31](https://doi.org/10.1017/cjlj.2015.31)
39. Phonetip K., Ozarska B., Brodie G.I. Comparing Two Internal Check Measurement Methods for Wood Drying Quality Assessment. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2017, vol. 75, iss. 1, pp. 139–142. DOI: [10.1007/s00107-016-1115-1](https://doi.org/10.1007/s00107-016-1115-1)

40. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Heidelberg, Physica-Verlag, 2001. 760 p. DOI: [10.1007/978-3-7908-1824-6](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6)
41. Prakash O., Ranjan S., Kumar A., Tripathy P.P. Applications of Soft Computing in Solar Drying Systems. *Solar Drying Technology*. Ed. by O. Prakash, A. Kumar. Singapore, Springer, 2016, pp. 419–430. DOI: [10.1007/978-981-10-3833-4_14](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4_14)
42. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, iss. 2, pp. 310–317. DOI: [10.1007/s10891-017-1569-y](https://doi.org/10.1007/s10891-017-1569-y)
43. Schneider J., Urban R. A Proof of Donsker's Invariance Principle Based on Support Functions of Fuzzy Random Vectors. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 27–42. DOI: [10.1142/S0218488518500022](https://doi.org/10.1142/S0218488518500022)
44. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. *Advances in Computational Intelligence and Learning*. Ed. by H.J. Zimmermann, G. Tselentis, M. van Someren, G. Dounias. Dordrecht, Springer, 2002, pp. 401–412. DOI: [10.1007/978-94-010-0324-7_28](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7_28)
45. Simulink Release Notes for R2008a. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/simulink/release-notes.Highlight> (accessed 15.02.19).
46. Situmorang Z., Situmorang J.A. Intelligent Fuzzy Controller for a Solar Energy Wood Dry Kiln Process. *2015 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E), September 7–9, 2015*. Samosir, Indonesia, 2015, pp. 152–157. DOI: [10.1109/TIME-E.2015.7389765](https://doi.org/10.1109/TIME-E.2015.7389765)
47. Situmorang Z., Wardoyo R., Hartati S., Istiyanto J.E. The Schedule of Optimal Fuzzy Controller Gain with Multi Model Concept for a Solar Energy Wood Drying Process Kiln. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 137–151.
48. Sychevskii V.A. Heat and Mass Transfer in Convective Wood-Drying Plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, iss. 3, pp. 705–771. DOI: [10.1007/s10891-018-1793-0](https://doi.org/10.1007/s10891-018-1793-0)
49. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, vol. SMC-15, iss. 1, pp. 116–132. DOI: [10.1109/TSMC.1985.6313399](https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399)
50. Uraon K.K., Kumar S. Analysis of Defuzzification Method for Rainfall Event. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2016, vol. 5, iss. 1, pp. 341–354.
51. Xu W., Liu G., Yu X. A Binomial Tree Approach to Pricing Vulnerable Option in a Vague World. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 143–162. DOI: [10.1142/S0218488518500083](https://doi.org/10.1142/S0218488518500083)
52. Yue H., Li J., Shi J., Yang W. Adaptive Fuzzy Tracking Control for Stochastic Nonlinear Systems with Time-Varying Input Delays Using the Quadratic Functions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 109–142. DOI: [10.1142/S0218488518500071](https://doi.org/10.1142/S0218488518500071)
53. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, iss. 3, pp. 338–353. DOI: [10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
54. Zadeh L.A. Fuzzy Logic. *Computer*, 1988, vol. 21, no. 4, pp. 83–93. DOI: [10.1109/2.53](https://doi.org/10.1109/2.53)
55. Zhao Y., Zhihui W., Iida I., Huang R., Lu J., Jiang J. Studies on Pre-Treatment by Compression for Wood Drying I: Effects of Compression Ratio, Compression Direction and Compression Speed on the Reduction of Moisture Content in Wood. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, iss. 2, pp. 113–119. DOI: [10.1007/s10086-014-1451-x](https://doi.org/10.1007/s10086-014-1451-x)
56. Zhou Z., Wang K. Sliding Mode Controller Design for Wood Drying Process. *Wood Science and Technology*, 2018, vol. 52, iss. 4, pp. 1039–1048. DOI: [10.1007/s00226-018-1006-1](https://doi.org/10.1007/s00226-018-1006-1)

MODELING THE PROCESS OF SAWN TIMBER DRYING

*A.G. Gorokhovskiy, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-6030-2018](#),
ORCID: [0000-0001-8847-8217](#)*

*V.V. Pobedinsky, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [G-3245-2018](#),
ORCID: [0000-0001-6318-3447](#)*

*E.E. Shishkina, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [O-6021-2018](#),
ORCID: [0000-0002-2584-4897](#)*

*E.V. Pobedinskiy, Postgraduate Student; ResearcherID: [R-2080-2018](#),
ORCID: [0000-0003-1838-309X](#)*

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: pobed@el.ru

The article considers the problem of sawn timber drying. The relevance of research is driven by the need to improve the automated process control system for drying sawn timber on the basis of modern information technologies, as well as to reduce the energy intensity of these technologies, which is enshrined in the program documents of forest industry development at the government level. The functional purpose of the automated control system is to provide a set level of the wood moisture content with the required quality of wood (zero ruptures). It is of immense complexity to obtain such functional dependency on the heating temperature in the chamber and the equilibrium air humidity by traditional statistical methods due to the uncertainty conditions of parameters, therefore, the apparatus of the fuzzy set theory should be used. Thus, the research purpose included generation of functional dependences of the sawn timber moisture content and drying time on the heating temperature and the equilibrium air humidity in the drying chamber based on fuzzy inference. The methodological basis of the theoretical studies was as follows: the theory of drying; the provisions of mathematical and fuzzy modeling; and, in terms of checking the adequacy of the proposed fuzzy model, the methods of mathematical statistics and experimental theory. The research results are the obtained dependences of the moisture content of sawn timber and drying time on the heating temperature and the equilibrium air humidity in the drying chamber, the synthesis of which is performed by means of Fuzzy Logic Toolbox of MATLAB application. The proposed functions of the moisture content and sawn timber drying time take into account the basic process configurations (the heating temperature and the equilibrium air humidity) and are experimentally verified for adequacy. The practical applicability of the results lies in the possibility of creating an intelligent system of automatic control of the sawn timber drying process.

For citation: Gorokhovskiy A.G., Pobedinsky V.V., Shishkina E.E., Pobedinskiy E.V. Modeling the Process of Sawn Timber Drying. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 154–166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166

Keywords: wood drying, wood moisture content, equilibrium air humidity, fuzzy modeling, fuzzy inference.

Поступила 15.02.19 / Received on February 2, 2019

УДК 662.6/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-167-179

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА В ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ КВУ-2000

В.К. Любов, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](#),

ORCID: [0000-0001-7050-1212](#)

А.Н. Попов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-5104-2019](#),

ORCID: [0000-0003-0144-1513](#)

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

Использование возобновляемых источников энергии – одно из приоритетных направлений развития современной энергетики. К возобновляемым источникам относится биомасса древесины, большие объемы которой в лесных регионах позволяют обеспечивать энергетическую независимость. Кроме того, применение древесной биомассы в энергетике способно решать целый ряд задач: получение сравнительно дешевой энергии, утилизация побочных продуктов лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, снижение негативного воздействия на окружающую среду и др. Ввиду наличия огромных запасов древесины для Северо-Запада России актуальны вопросы рационального и эффективного использования древесных ресурсов. Современные водогрейные котлы, сжигающие древесное топливо, позволяют комплексно решать энергетические и экологические проблемы при обеспечении отопительных нагрузок потребителей. Цель работы – определение теплотехнических и экологических показателей водогрейного котлоагрегата КВУ-2000 при сжигании побочных продуктов предприятий лесопромышленного комплекса. По результатам энергетического обследования определены составляющие теплового баланса котла, выбросы газообразных веществ, твердых и сажистых частиц. Установлено, что приемлемые технико-экономические и экологические показатели КВУ-2000 обеспечиваются при сжигании древесного топлива с неоднородным гранулометрическим составом. Однако ручная регулировка расхода вторичного воздуха и отсутствие контроля концентрации кислорода в уходящих газах не дают возможности поддерживать оптимальный воздушный режим процесса горения. Отсутствие приборов контроля сопротивления золоулавливающих устройств и тепловой изоляции на всех элементах газового тракта за котлом вызывает нерациональные энергетические потери, что противоречит требованиям действующих нормативных документов. Ограниченный период эксплуатации между чистками поверхности нагрева дымогарного теплообменника предъявляет повышенные требования к резервированию установленной мощности. Устранение выявленных недостатков сможет обеспечить существенное повышение энергоэкономических показателей работы водогрейных котлов, приведет к снижению выбросов вредных веществ при сжигании биотоплив, что позволит рекомендовать их для систем теплоснабжения Северо-Арктического региона.

Для цитирования: Любов В.К., Попов А.Н. Эффективность сжигания древесного топлива в водогрейных котлах КВУ-2000 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 167–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-167-179

Благодарность: Авторы выражают благодарность Д.Г. Чухчину за выполнение исследований с использованием метода электронной растровой микроскопии.

Ключевые слова: водогрейный котел, древесное топливо, вредные вещества, топка, потери тепла, коэффициент полезного действия.

Введение

Развитие общества сопровождается увеличением спроса на энергоносители, однако запасы традиционных невозобновляемых энергоресурсов ограничены. Поэтому вовлечение в топливный баланс отходов лесозаготовок и побочных продуктов предприятий лесоперерабатывающей промышленности является актуальным направлением решения данной проблемы [3, 4, 7, 14–16, 18]. Ежегодно в России образуется порядка 35,5 млн м³ древесных отходов [6], а общемировой объем побочных продуктов от заготовки, обработки и переработки ежегодного прироста биомассы составляет 220 млрд т [20].

Замена традиционных энергетических ресурсов древесным топливом приводит к снижению выбросов вредных веществ в атмосферу, так как при его сгорании выделяется такое же количество углекислого газа, какое связывается в процессе прироста биомассы, что не нарушает естественный баланс CO₂ в атмосфере Земли [3, 6].

Переход от ископаемых видов топлива к возобновляемым источникам энергии – ключевой пункт стратегии, направленной на сохранение климата, защиту окружающей среды, решение проблем с энергообеспечением, а также полностью соответствует положениям Парижского соглашения по сдерживанию климатических изменений, которое одобрили 195 стран. За последние десятилетия в России достигнуто значительное сокращение выбросов, тем не менее наша страна является четвертым крупнейшим эмитентом выбросов парниковых газов [1, 2, 5, 10, 19]: доля Российской Федерации (РФ) в глобальных антропогенных выбросах парниковых газов составляет 5 %.

Для энергетического использования древесной биомассы необходимо применять современные теплогенерирующие установки, к которым относятся и водогрейные котлы КВУ-2000, имеющие достаточно хорошие позиции в конкурентной борьбе с энергоустановками других отечественных и зарубежных фирм. В настоящее время на объектах малой энергетики РФ работает более 2 тыс. котлов данного типа, в Архангельской области – около 30.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в котельной с. Холмогоры, оборудованной 6 котлами КВУ-2000, рассчитанными на сжигание древесного топлива, поступающего из пос. Двинской Березник. Котельная имеет топливный склад с «живым дном». Подача биотоплива в индивидуальные бункера-дозаторы водогрейных котлов осуществляется скребковыми транспортерами. В бункерах-дозаторах, недалеко от толкателей, установлены датчики контроля уровня температуры, что позволяет исключить возможность «обратного» возгорания топлива. Из бункеров-дозаторов древесное топливо с помощью толкателя в режиме подача/пауза подается на наклонную колосниковую решетку. Регулирование расхода топлива, поступающего на решетку, осуществляется изменением продолжительности периодов подачи и паузы. При проведении обследования продолжительность подачи составляла 3 с, продолжительность паузы варьировалась.

Твердотопливный котел КВУ-2000 номинальной мощностью 2 МВт имеет модульную конструкцию и состоит из топки, газовой водяной теплообменника, системы очистки дымовых газов, дымососа с системой газоходов и вентиляторов первичного и вторичного воздуха. Котельная оборудована

2 дымовыми трубами диаметром 0,8 м и высотой 18 м. С помощью системы газоходов к каждой из них подключено по 3 котла.

Топочное устройство «адиабатического» типа формируется из нескольких камер (рис. 1), позволяющих увеличить время пребывания газов в зоне высоких температур.

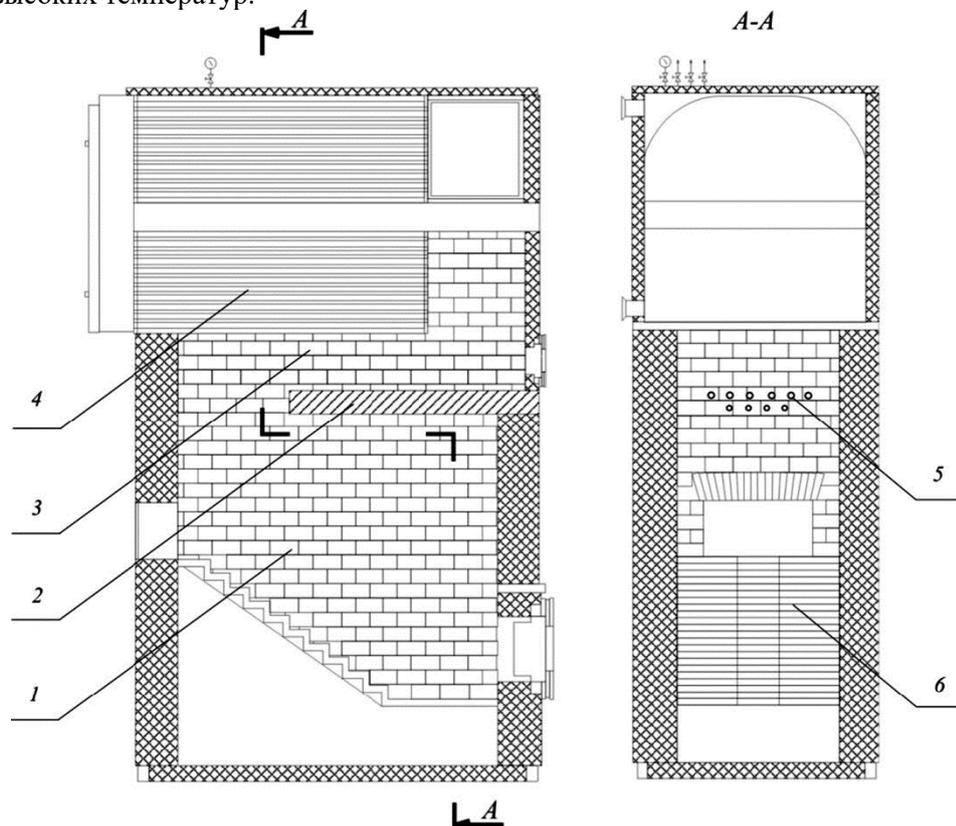


Рис. 1. Устройство твердотопливного водогрейного котла КВУ-2000: 1 – топка; 2 – арочный свод; 3 – камера дожига; 4 – двухходовой газовойодяной теплообменник; 5 – сопла вторичного воздуха; 6 – колосниковая решетка

Fig. 1. The construction of the solid fuel boiler KVU-2000: 1 – furnace; 2 – brick trimmer; 3 – afterburn chamber; 4 – two-pass gas-water heat exchanger; 5 – secondary air nozzles; 6 – grate

Тяжелая обмуровка топки обеспечивает возможность ее работы при температурах до 1300 °С. Использование арочного свода в конструкции топочного устройства в совокупности с принудительным вводом вторичного воздуха через 2 ряда цилиндрических сопел, выполненных на фронтальной стене котла, позволяет сжигать топливо с относительной влажностью до 55 %.

Наличие колосниковой решетки, имеющей наклонный и горизонтальный участки, и системы распределения первичного воздуха по ее длине допускают возможность использования топлива с широким диапазоном изменения гранулометрического состава и сжигания биотоплива повышенной зольности.

Комплект дутьевых вентиляторов и система воздушных каналов в обшивке котла обеспечивают поступление предварительно нагретого первичного воздуха под колосниковую решетку и вторичного воздуха в камеру дожигания.

Для подачи воздуха используются центробежные вентиляторы, при этом электропривод у вентилятора первичного воздуха имеет мощность 4,0 кВт, вторичного – 1,5 кВт. Воздухозаборные устройства расположены на наружной обшивке котла.

Камера дожига, футерованная шамотным кирпичом, увеличивая активный объем топочного устройства, обеспечивает возможность работы в высокотемпературном режиме и повышает полноту выгорания горючих компонент топлива.

Дымогарный теплообменник для обеспечения безопасной эксплуатации оснащен необходимыми предохранительными устройствами. Поверхность нагрева теплообменника – 172 м².

Для очистки уходящих дымовых газов используется инерционный золоуловитель (ЦН-15). Транспортировка продуктов сгорания осуществляется с помощью дымососа ДН-8, оборудованного электродвигателем мощностью 15 кВт с частотным регулированием. Автоматизированная система АСУ-1 обеспечивает управление работой котла.

На всех газоходах от котлов до дымовых труб, а также на золоуловителях тепловая изоляция отсутствует (рис. 2), что не только противоречит требованиям [8, 9], но и вызывает дополнительные потери, которые приходится учитывать при расчете потерь тепла в окружающую среду.

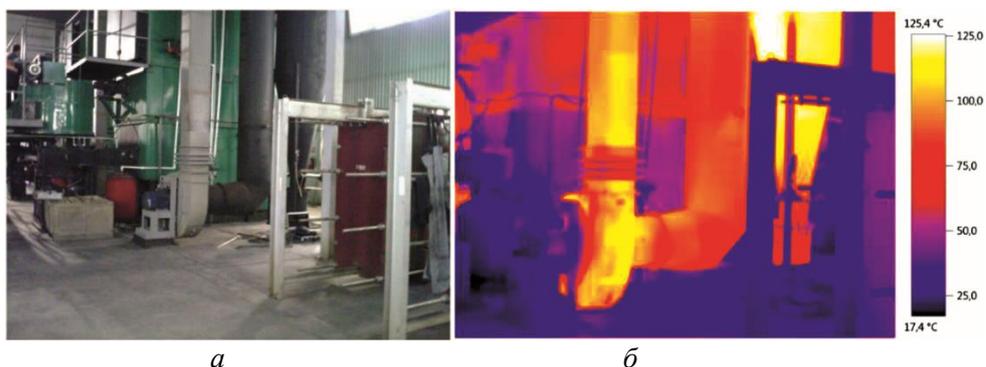


Рис. 2. Газоходы и золоуловитель котла КВУ-2000 № 1 (а) и результаты их тепловизионной съемки (б)

Fig 2. Gas ducts and ash collector of the KVU-2000 boiler No. 1 (a) and the results of their thermal imaging (b)

Осмотр системы газоходов показал, что с точки зрения аэродинамики они имеют не оптимальный профиль и их врезка под прямым углом в дымовую трубу вызывает дополнительные аэродинамические потери.

Установлено, что приборы учета тепла, выработанного водогрейными котлами, и приборы контроля разрежения до и после золоуловителей отсутствуют, чистка котлов осуществляется вручную, продолжительность работы между остановками для чистки труб дымогарного теплообменника составляет 2 недели.

В процессе комплексного энергетического обследования были проведены: внешний и внутренний осмотр элементов водогрейного котла; тарировка газохода; анализ работы основного и вспомогательного оборудования; балан-

совые опыты; анализ технико-экономических и экологических характеристик работы котла.

Энергообследование проводилось в соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленно-эксплуатационным испытаниям 3-й категории сложности [12]. При исследовании состава продуктов сгорания использовался газоанализатор Testo-350 XL. Диоксид серы в дымовых газах отсутствовал при всех режимах работы котла.

Для установления расходов дымовых газов применялись пневмометрическая трубка системы ВТИ и микроанометр прецизионного прибора Testo-435. Результаты исследования поля скоростей необходимы в процессе определения концентрации твердых частиц в дымовых газах методом внешней фильтрации, для реализации которого использовались аспирационная установка ОП-442 ТЦ с трубкой изокинетического отбора, фильтродержатель АФА и др.

Твердые частицы, уловленные из потока дымовых газов, исследовались на электронном растровом микроскопе Zeiss SIGMA VP (фирма «Carl Zeiss») в целях определения их структуры, размера, формы и количественного состава входящих элементов.

Теплотехнический анализ древесного топлива проводился в САФУ с помощью установок лаборатории комплексного термического анализа и калориметра ИКА С 2000 basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25.

Исследования гранулометрического состава топлива и очаговых остатков выполнялись с помощью анализаторов AS 200 Control и «029» в соответствии с [12].

При определении потерь тепла в окружающую среду использовались комбинированный относительный метод, при котором для установления температур ограждающих конструкций котла применялся пирометр, и тепловизионный метод. Для выполнения съемки использовался тепловизор Testo 885-2, позволяющий находить в реальном времени распределение температур по поверхности объекта с точностью ± 2 %. С помощью встроенной цифровой камеры были дополнительно получены изображения объектов в видимом спектре света.

Расход топлива определялся по уравнению обратного теплового баланса. Экспериментальные данные обрабатывались с помощью многомодульного программно-методического комплекса [3].

В качестве «балансового» измерительного сечения на котле КВУ-2000 был выбран прямой участок газохода после циклонного золоуловителя. Коэффициент неравномерности распределения скорости потока для данного сечения составил 0,98.

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении энергообследования в топке котла КВУ-2000 № 1 сжигалось древесное топливо, основную долю которого составляла щепа (рис. 3), массовая доля опилок в составе – около 23 %.

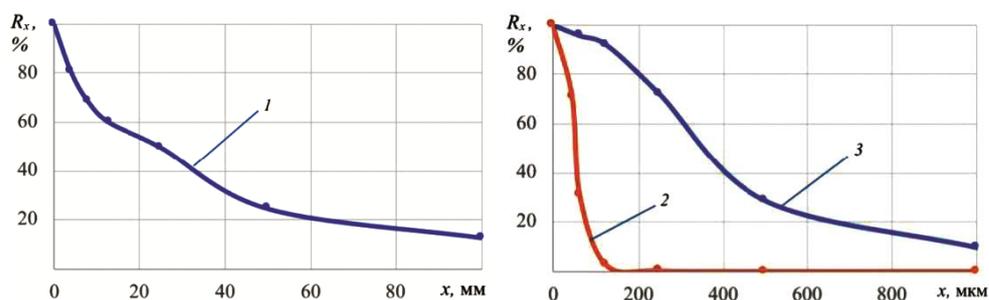


Рис. 3. Гранулометрический состав топлива (а) и очаговых остатков (б): 1 – топливо; 2 – уловленная зола; 3 – шлак с провалом

Fig. 3. Grain size distribution of fuel (a) and ash residues (b): 1 – fuel; 2 – collected ash; 3 – slag with ashpit

Значения полных остатков (R_x), приведенные на рис. 3 (кривая 1), свидетельствует, что R_x на сите с размером ячеек $x = 5$ мм составил 77 %. Сжигаемое топливо обладало высокой полидисперсностью (средний коэффициент неоднородности состава $n = 0,703$; показатель крупности частиц $b = 0,64 \cdot 10^{-3}$), что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к топкам данного типа. Состав очаговых остатков (зола и шлак), образующихся при сгорании топлива, мелкодисперсный (кривые 2 и 3), что обеспечивало их нормальное удаление.

Влажность древесного топлива имела умеренные значения (табл. 1).

Таблица 1

Некоторые результаты энергетического обследования водогрейного котла

Показатель	Обозначение, размерность	Опыт	
		№ 1	№ 2
Теплопроизводительность	Q , МВт	1,175	1,75
Рабочее давление воды на выходе	$P_{в}$, МПа	0,15	0,15
Температура воды на выходе	$t_{вых}$, °С	52,0	56,0
Влажность топлива	W_f^r , %	46,20	
Зольность топлива	A^r , %	0,99	
Выход летучих веществ	V^{daf} , %	81,87	
Низшая теплота сгорания	Q_{is}^r , МДж/кг	8,874	
Температура уходящих газов	$\vartheta_{вх}$, °С	122,0	145,0
Избыток воздуха в уходящих газах	$\alpha_{вх}$	3,23	1,83
Потери тепла:			
с уходящими газами	q_2 , %	9,87	8,51
с химнедожогом	q_3 , %	0,89	0,41
с мехнедожогом	q_4 , %	0,26	0,28
в окружающую среду	q_5 , %	4,34	2,91
КПД котла брутто	$\eta_{бр}$, %	84,59	87,84
Полный расход биотоплива	B , кг/ч	562	807
Расход газов за дымососом	G , м ³ /ч	5238	4597
Эмиссия:			
NO _x	NO _x , мг/МДж	81	84
СО	СО, мг/МДж	983	486
твердых частиц	$\Xi_{тв.ч}$, мг/МДж	66,94	64,45

Порционная подача топлива в топочную камеру вызывает пульсации разрежения, для котла № 1 диапазон изменения разрежения в топке составлял 10...200 Па. Экспериментальные работы, выполненные на данном водогрейном котле, а также на других теплогенерирующих установках [3], показали, что не следует допускать работу котлов с разрежением в топке более 100 Па, так как при повышении разрежения ухудшаются условия выгорания топлива вследствие затягивания факела в конвективные поверхности нагрева и возникновения высокоамплитудных пульсаций в топке.

Теплопроизводительность котла КВУ-2000 при проведении энергообследования составляла 58,8...87,5 % от номинальной. При этом частотная характеристика дымососа изменялась в диапазоне 47,0...49,8 Гц. Значения полного расхода древесного топлива приведены в табл. 1.

Выполненные замеры показали, что наличие охлаждающих каналов в обшивке котла КВУ-2000 позволяет обеспечить подогрев первичного ($t_{\text{пер.в}} = 40$ °С) и вторичного ($t_{\text{втор.в}} = 58$ °С) воздуха, подаваемого в топку котла, и снизить температуру, а, соответственно, и потери тепла от ограждающих конструкций в окружающую среду. Однако полное отсутствие теплоизоляции на газоходах и золоуловителе повышало данные потери тепла, что учитывалось при обработке экспериментальных данных.

Отсутствие стационарных приборов контроля концентрации кислорода в уходящих газах и ручная регулировка расхода вторичного воздуха не позволяют поддерживать оптимальный воздушный режим горения, тем не менее наличие «адиабатической» топки и удовлетворительные теплотехнические характеристики сжигаемого топлива обеспечивают умеренные выбросы монооксида углерода и потери тепла с химическим недожогом топлива. При этом КПД брутто котла № 1 при его работе с нагрузкой, близкой к номинальной (опыт № 2), имел достаточно высокое значение.

Соппротивление котла по газовому тракту с учетом газохода и золоуловителя в исследованном диапазоне нагрузок составляло 0,55...0,97 кПа.

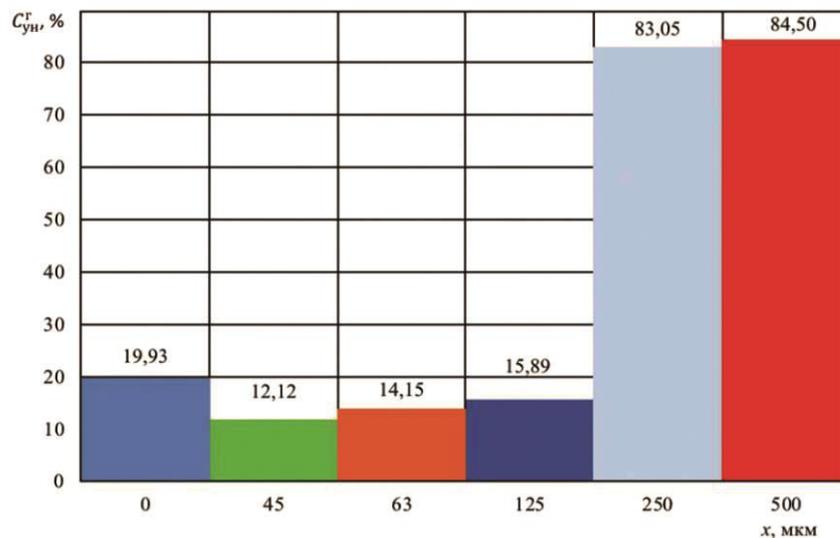
Результаты исследования работы котла показали, что повышенные значения потерь тепла с уходящими газами объясняются большими значениями коэффициента избытка воздуха в этих газах.

Эффективное перемешивание вторичного воздуха с горючими компонентами и ступенчатый ввод воздуха обеспечивают допустимые значения потерь тепла от химической неполноты сгорания топлива. Однако оптимизация воздушного баланса топочной камеры способствует значительному снижению выбросов оксида углерода и потерь тепла от химического недожога.

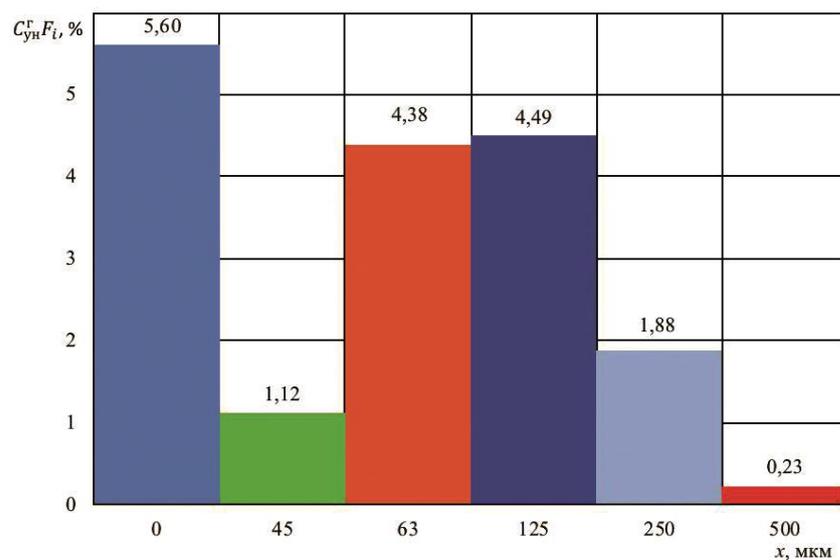
Низкая зольность сжигаемого древесного топлива и умеренное содержание горючих веществ в летучей золе ($C_{\text{ун}}^r = 17,7...17,9$ %) и в шлаке ($C_{\text{шл}}^r = 3,5...3,9$ %) сохранили низкий уровень потерь тепла с механической неполнотой сгорания. Тем не менее для летучей золы, уловленной в циклонном золоуловителе, было выполнено исследование гранулометрического состава (рис. 3) и пофракционного содержания горючих веществ (рис. 4).

Экспериментальные данные показали, что отобранная в золоуловителе циклонного типа зола имеет высокую степень полидисперсности ($n = 0,975$) и относится к тонкодисперсным веществам ($b = 0,0104$). Массовая доля в летучей золе частиц с размером менее 0,25 мм составляет более 97 % (см. рис. 3). Максимальное содержание горючих веществ имеют частицы с размером 0,25 мм и более (рис. 4, а), но массовое содержание которых невелико. Исходя

из этого механический недожог топлива определяет унос углеродосодержащих аэрозолей размером менее 0,25 мм (рис. 4, б).



a



б

Рис. 4. Содержание горючих веществ в уловленной золе: *a* – по фракциям; *б* – с учетом массовой доли различных фракций

Fig. 4. The content of combustibles in caught ash: *a* – by fractions; *б* – in reliance on the weight content of various fractions

Определение запыленности дымовых газов проводилось в газоходе после золоуловителя. Запыленный поток отбирался с учетом результатов предварительно проведенных тарировок. Концентрация твердой фазы в дымовых газах рассчитывалась в соответствии с требованиями [12].

Среднее значение эмиссии твердых частиц в дымовых газах после золоуловителя циклонного типа при нагрузке котла 87,5 % от номинальной составило 100,4 мг/нм³. Для сбора твердых частиц и регулирования расхода от-

бираемых газов была использована аспирационная установка ОП-442 ТЦ с трубкой изокинетического отбора.

Для определения потерь тепла в окружающую среду применялся относительный метод [12, 15], базирующийся на установлении температур ограждающих конструкций котлоагрегата. Для замера температур стенки обследованных котельных агрегатов делились на равные геометрические участки, в каждом из которых с помощью бесконтактного термометра определялась средняя температура. Кроме того, для реализации метода выполнен замер геометрических размеров элементов котлоагрегата, найдены фактическая нагрузка, температура воздуха в зоне, достаточно удаленной от теплоотдающих поверхностей. С использованием полученных данных рассчитывались коэффициенты теплоотдачи наружных поверхностей элементов котлоагрегатов и потери тепла в окружающую среду [15]. Для исключения возможных погрешностей относительный метод был дополнен результатами тепловизионной съемки. Экспериментально определенные потери тепла в окружающую среду для водогрейного котла КВУ-2000 № 1 составили $q_5^{\text{НОМ}} = 2,55 \%$, что меньше значений, полученных по обобщающим зависимостям [11]. Некоторые результаты тепловизионных съемок наружных поверхностей котла № 1 приведены на рис. 2 и 5.

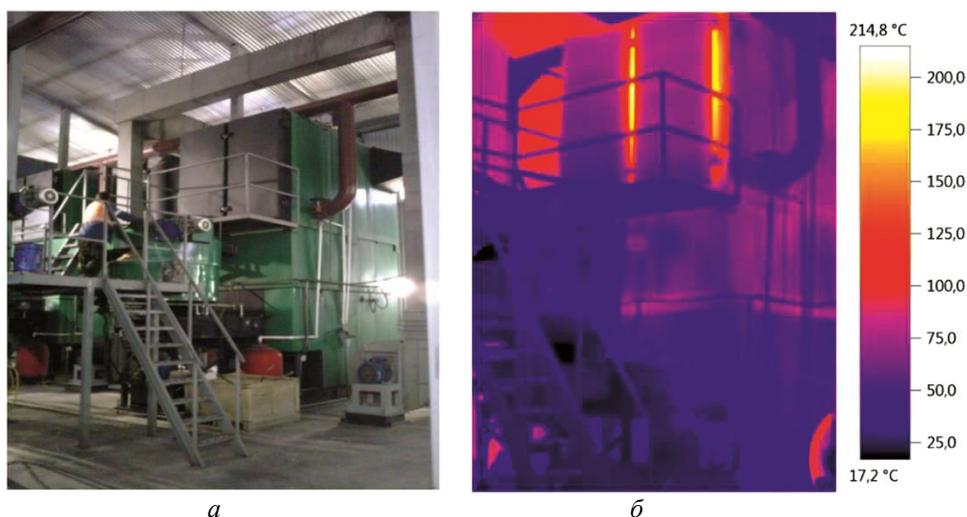


Рис. 5. Фронтальная и правая стены котла КВУ-2000 № 1 (а) и результаты их тепловизионной съемки (б)

Fig 5. Front and right walls of the KVU-2000 boiler No. 1 (a) and the results of their thermal imaging (b)

Потери с физической теплотой шлака при работе котла на древесном топливе, имеющем достаточно благоприятные теплотехнические характеристики, не превышали $q_6 = 0,05 \%$. В шлаке с полидисперсным гранулометрическим составом ($n = 1,185$) доминировали частицы размером менее 1,00 мм (см. рис. 3).

Удельный расход условного топлива на выработку 1 Гкал в исследованном диапазоне нагрузок у котла КВУ-2000 № 1 составил 162,6...168,9 кг.

Эмиссия оксидов азота имела умеренные значения (табл. 1), однако существует значительный резерв для их снижения путем оптимизации воздушного режима топочной камеры.

По результатам исследования выбросов сажевых частиц [4, 5, 7] среднее значение эмиссии при сжигании древесного топлива составило 19,330 г/ГДж (при фактической нагрузке 1,75 МВт), при этом эмиссия сажевых частиц размером менее 2,5 мкм при коэффициенте пересчета 0,14 [13, 17] – 2,706 г/ГДж.

В ходе исследования твердых частиц с помощью электронного растрового микроскопа установлено, что в отобранных пробах содержится 3 основных вида частиц: шарообразной формы; с аморфной структурой; кристаллические. При этом преобладают частицы неправильной формы размером 0,02...5,00 мкм (рис. 6).

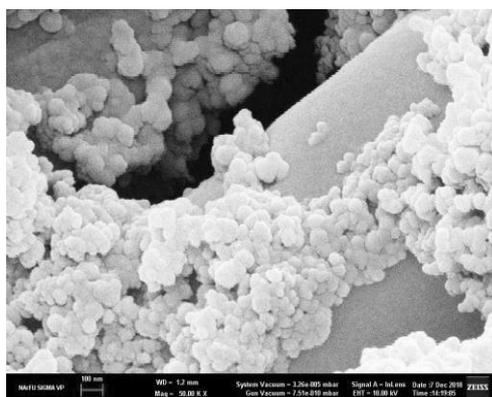


Рис. 6. Структура частиц, образующихся в результате сжигания древесного топлива

Fig 6. The structure of particles formed during the wood fuel combustion

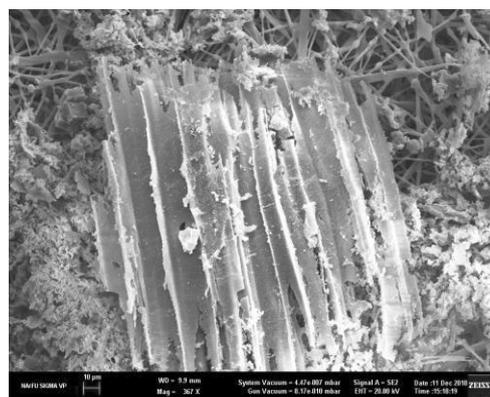


Рис. 7. Несгоревшие частицы древесины, уносимые в газовый тракт котла

Fig 7. Unburned wood particles carried into the boiler gas duct

Значительное количество избыточного воздуха, подаваемого в топку котла, снижает уровень температуры в ней и вызывает вынос невыгоревших древесных частиц за ее пределы. Так, в частицах, отобранных из газового потока до золоуловителя, в небольшом количестве содержатся частички древесины размером до 170 мкм, прошедшие только начальный этап термического разложения и горения (рис. 7).

Элементный состав сухой массы уловленных частиц различается, поэтому в табл. 2 он приведен в виде диапазона.

Таблица 2

Основные элементы, входящие в состав твердых частиц, уносимых в дымовую трубу

Элемент	Содержание элемента, %	Элемент	Содержание элемента, %
C	28,0...64,0	Fe	0,2...2,7
O	3,5...30,5	Mg	0,2...1,4
Ca	0,3...24,5	Mn	0,2...1,4
Si	0,4...5,7	K	0,2...3,6
S	0,0...0,5	Zn	0,0...0,6

Как известно, древесина хвойных пород состоит преимущественно из клеток одного типа – прозенхимных, которые представлены в основном трахеидами. Размеры трахеид зависят от вида древесины и других факторов, в их стенках имеются простые и окаймленные поры.

Заключение

Комплексное энергообследование показало, что котлоагрегаты КВУ-2000 обеспечивают приемлемые технико-экономические и экологические показатели при сжигании древесного топлива, имеющего неоднородный гранулометрический состав. Однако ручная регулировка расхода вторичного воздуха и отсутствие приборов контроля концентрации кислорода в уходящих газах не позволяют поддерживать оптимальный воздушный режим процесса горения. Отсутствие приборов контроля сопротивления золоулавливающих устройств и приборов, фиксирующих теплопроизводительность энергоисточника, а также тепловой изоляции на всех элементах газового тракта за котлом вызывает нерациональные энергетические потери и противоречит требованиям действующих нормативных документов. Ограниченный период эксплуатации между чистками поверхности нагрева газодыяного теплообменника предъявляет повышенные требования к резервированию установленной мощности энергоисточника. Устранение выявленных недостатков обеспечит существенное повышение технико-экономических показателей работы котлов, приведет к снижению выбросов вредных веществ при сжигании биотоплив, что позволит рекомендовать данные энергоустановки для систем теплоснабжения Северо-Арктического региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Башмаков И., Мышак А. Затраты и выгоды реализации стратегий низкоуглеродного развития России: перспективы до 2050 г. // *Вопр. экономики*. 2014. № 8. С. 70–91. [Bashmakov I., Myshak A. Costs and Benefits of the Transition to Low-Carbon Economy in Russia: Perspectives up to 2050. *Voprosy Ekonomiki*, 2014, no. 8, pp. 70–91]. DOI: [10.32609/0042-8736-2014-8-70-91](https://doi.org/10.32609/0042-8736-2014-8-70-91)
2. Кокорин А. Новые факторы и этапы глобальной и российской климатической политики // *Экономическая политика*. 2016. Т. 11, № 1. С. 157–176. [Kokorin A.O. New Factors of the Global and Russian Climate Policy. *Ekonomicheskaya Politika*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 157–176]. DOI: [10.18288/1994-5124-2016-1-10](https://doi.org/10.18288/1994-5124-2016-1-10)
3. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с. [Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Efficiency Improvement of the Biofuels Energy Use*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 533 p.]
4. Любов В.К., Малыгин П.В., Попов А.Н., Попова Е.И. Исследование эффективности работы водогрейного котла при сжигании биотоплив // *Биотехнологии в химико-лесном комплексе: материалы междунар. науч. конф.*, Архангельск, 11–12 сент. 2014 г. Архангельск: САФУ, 2014. С. 201–205. [Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Biofuel Combustion Efficiency of the Hot-Water Boiler. *Biotechnologies in the Chemical and Forest Complex: Proceedings of the International Scientific Conference, Arkhangelsk, September 11–12, 2014*. Arkhangelsk, NArFU, 2014, pp. 201–205].
5. Макаров И.А., Чен Х., Пальцев С.В. Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России // *Вопр. экономики*. 2018. № 4. С. 76–94. [Makarov I.A., Chen H., Paltsev S.V. Impacts of Paris Agreement on Russian Economy. *Voprosy Ekonomiki*, 2018, no. 4, pp. 76–94]. DOI: [10.32609/0042-8736-2018-4-76-94](https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-4-76-94)

6. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Электрон. науч. журн. «Инж. вестн. Дона». 2015. № 2, ч. 2. С. 81. [Mokhirev A.P., Bezrukikh J.A., Medvedev S.O. Recycling of Wood Wastes of Timber Industry, as a Factor of Sustainable Resource Management. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2015, no. 2, part 2, p. 81].

7. Попова Е.И., Попов А.Н., Любов В.К., Варакин Е.А. Сжигание твердых топлив в водогрейном котле Firematic 60 // Природопользование в Арктике: современное состояние и перспективы развития: сб. науч. тр. 1-й междунар. науч.-практ. конф., Якутск, 22–25 сент. 2015 г. Якутск: СВФУ, 2015. С. 464–473. [Popova E.I., Popov A.N., Lyubov V.K., Varakin E.A. Solid Fuels Combustion in the Boiler Firematic 60. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "Nature Management in the Arctic: Current State and Development Potential"*, Yakutsk, September 22–25, 2015. Yakutsk, NEFU Publ., 2015, pp. 464–473].

8. ПБ 10-574–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. М.: ПИО ОБТ, 2003. 215 с. [PB 10-574–03. *Rules for the Construction and Safe Operation of Steam and Water Boilers*. Moscow, PИO ОБT Publ., 2003. 215 p.].

9. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Мин-во энергетики РФ. М.: Энергосервис, 2003. 368 с. [Rules for Technical Operation of Power Plants and Grids of the Russian Federation. Moscow, Energoservis Publ., 2003. 368 p.].

10. Сафонов Г.В., Стеценко А.В., Дорина А.Л., Авалиани С.Л., Сафонова Ю.Л., Беседовская Д.С. Стратегия низкоуглеродного развития России. Возможности и выгоды замещения ископаемого топлива «зелеными» источниками энергии М.: ТЕИС, 2016. 48 с. [Safonov G.V., Stetsenko A.V., Dorina A.L., Avaliani S.L., Safonova Yu.L., Besedovskaya D.S. The Strategy of Low-Carbon Development of Russia. *Opportunities and Benefits of Substitution of Fossil Fuels with "Green" Energy Sources*. Moscow, TEIS Publ., 2016. 48 p.].

11. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / ПАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с. [Thermal Calculation of Boilers (Normative Method). Saint Petersburg, 1998. 257 p.].

12. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с. [Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeyeva A.A. *Heating Tests of Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 416 p.].

13. Borchsenius H., Borgnes D. Black Carbon Emissions from the District Heating Sector in the Barents Region. *NORSK ENERGI. Ministry of Environment of Norway. Project Name: RUS-11/0060*. Norway, 2013. 56 p.

14. Flach B., Bendz K., Krautgartner R., Lieberz S. *EU-27. Biofuels Annual Report No. NL3034*. The Hague, USDA Foreign Agricultural Service, 2013. 34 p.

15. Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Determining Heat Loss into the Environment Based on Comprehensive Investigation of Boiler Performance Characteristics. *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, iss. 8, pp. 572–576. DOI: [10.1134/S004060151506004X](https://doi.org/10.1134/S004060151506004X)

16. Magdziarz A., Wilk M., Straka R. Combustion Process of Torrefied Wood Biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, pp. 1339–1349. DOI: [10.1007/s10973-016-5731-0](https://doi.org/10.1007/s10973-016-5731-0)

17. Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S-M., Baltensperger U. et al. Recommendations for Reporting "Black Carbon" Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol. 13, pp. 8365–8379. DOI: [10.5194/acp-13-8365-2013](https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013)

18. Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C., Santana R.M.C. Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 109, pp. 148–153. DOI: [10.1016/j.biortech.2011.11.122](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122)

19. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on Renewable Sources: Prospects for the World and for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, iss. 6, pp. 433–440. DOI: [10.1134/S101933161606006X](https://doi.org/10.1134/S101933161606006X)

20. *World Energy Resources: 2013 Survey*. Ch. 7. Bioenergy. London, World Energy Council, 2013. 24 p. Available at: https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_7_Bioenergy.pdf (accessed 27.12.18).

COMBUSTION EFFICIENCY OF WOOD FUEL IN THE WATER BOILERS KVVU-2000

V.K. Lyubov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: [0000-0001-7050-1212](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212)

A.N. Popov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-5104-2019](https://orcid.org/0000-0003-0144-1513),

ORCID: [0000-0003-0144-1513](https://orcid.org/0000-0003-0144-1513)

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

Renewable energy use is one of priority areas of power production development. One of the sources is wood biomass. Utilization of wood biomass in the regions with developed timber industry is a prospective decision in ensuring power independence. Wood biomass usage allows to recover by-products of logging and woodworking industries, generate cheaper electric power and reduce an impact on the environment. The North-West of Russia has huge wood reserves. As a result, the issues of efficient utilization of wood biomass are relevant for the region. An effective way of the complex solution of energetical and ecological problems with provision of heating loads is application of modern devices operating on wood fuel such as modern water boilers. This study aims to analyze heat engineering and environmental performance of the boiler KVVU-2000 during the combustion of by-products of timber industry. The components of the boiler's heat balance and gaseous effluents have been determined. Emissions of particulate matter and the content of soot particles have been studied. The study results have shown that the boiler KVVU-2000 provides high economic and environmental performance when operating on polydisperse wood fuel. However, a manual regulation of secondary air flow and absence of the flue gas oxygen control systems do not allow to keep optimum combustion air-blown mode. Absence of resistance control devices for ash collectors and thermal insulation of elements in post-combustion gas path lead to irrational heat losses, which conflicts with normative regulations. A limited operational period between cleaning of heating surfaces of a fire-tube boiler demands strict requirements to capacity redundancy. Elimination of identified flaws will ensure substantial increase of energetic and economic performance of the boilers; allow to minimize the emissions of harmful substances of biofuel burning, and recommend these boilers for application in heat supply systems in the Arctic region.

For citation: Lyubov V.K., Popov A.N. Combustion Efficiency of Wood Fuel in the Water Boilers KVVU-2000. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 167–179. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-1-167-179](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-167-179)

Acknowledgments: The authors are grateful to D.G. Chukhchin for carrying out the research using the scanning electron microscopy method.

Keywords: water boiler, wood fuel, harmful substances, furnace, heat losses, efficiency.

Поступила 31.12.18 / Received on December 31, 2018



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.017.043

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-180-189

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЕЙ
ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОБРАЗЦЕ КАРТОНА ТОПЛАЙНЕР
ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ***А.Н. Романова¹, аспирант**Я.В. Казаков¹, д-р техн. наук, проф.; Researcher ID: [J-4634-2012](#),**ORCID: [0000-0001-8505-5841](#)**А.В. Малков^{1,2}, канд. хим. наук, доц.*¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: a.romanova@narfu.ru, j.kazakov@narfu.ru, a.malkov@narfu.ru²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: a.malkov@narfu.ru

Представлена методика количественной оценки распределения локальных растягивающих (продольных), сжимающих (поперечных) и сдвиговых деформаций в образце целлюлозно-бумажного материала и результаты ее использования при приложении к образцу одноосной растягивающей нагрузки. Применение данной методики позволило установить значения, степень неоднородности и закономерности изменения локальных деформаций в образце картона топлайнер, обладающего неоднородной и анизотропной структурой, в зависимости от общей величины деформации образца и направления ориентации волокон в нем. В основе методики лежит испытание образцов с предварительно нанесенной сеткой точек на растяжение с постоянной скоростью, в процессе которого выполняются фотофиксация образцов и регистрация кривой «нагрузка–удлинение». С применением специального программного обеспечения осуществляется определение координат узлов сетки и их смещения при растяжении. Анализ данных и вычисление локальных деформаций производится с применением алгоритмов метода конечных элементов. Экспериментально установлено, что при увеличении угла преимущественной ориентации волокон в образцах картона машинного направления локальные продольные деформации возрастают, поперечные уменьшаются, а сдвиговые имеют максимум 45°. Подтвержден рост средней величины абсолютных значений локальных деформаций всех видов при увеличении общей деформации образца. Установлено, что неоднородность локальных деформаций, оцениваемая по среднеквадратическому отклонению, возрастает с увеличением их абсолютной величины, а тенденции изменения зависят от направления ориентации волокон в структуре образца.

Для цитирования: Романова А.Н., Казаков Я.В., Малков А.В. Количественная характеристика полей локальных деформаций в образце картона топлайнер при одноосном растяжении // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 180–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-180-189

Ключевые слова: картон топлайнер, структурная неоднородность, анизотропия, деформация, метод конечных элементов.

Введение

Гофрированный картон является одним из наиболее востребованных упаковочных материалов и широко применяется для изготовления транспортной тары, используемой для перевозок, складирования и хранения товарной продукции. Его каркасная структура представляет собой сэндвич, состоящий из картона для плоских слоев (лайнер) и бумаги для гофрирования (флютинг). Картон для плоских слоев обеспечивает гофрированному картону и изделиям из него высокую механическую прочность, каркасную жесткость и устойчивость к эксплуатационным нагрузкам [1]. Использование картона-лайнера с белым верхним слоем «топлайнер» в наружных слоях гофрокартона не только гарантирует заданный уровень прочностных и барьерных свойств, но и несет информационную функцию при нанесении на его белую поверхность маркировки.

Механические характеристики картона топлайнер тесно связаны с особенностями строения его структуры и во многом определяют качественные показатели гофрированного картона и изделий из него [3]. Волокнистая природа, морфологические особенности структурных элементов, интенсивность водородных связей между волокнами, неравномерность их распределения в плоскости листа, применяемые технологии производства и оборудование приводят к возникновению явлений неоднородности и анизотропии в структуре топлайнера [1, 4, 20, 22]. Это, в свою очередь, обуславливает неоднородность и анизотропность его физических и упругопластических свойств, что характерно для структуры любого целлюлозно-бумажного материала [2, 18, 21].

Структурная неоднородность визуально оценивается по равномерности просвета топлайнера и оказывает непосредственное влияние на его деформационное поведение при приложении внешней нагрузки [2, 3, 9, 10, 13]. Флоккулы и промоины, образующиеся при формировании картонного полотна, сохраняются в готовом листе и наблюдаются в проходящем свете (рис. 1).

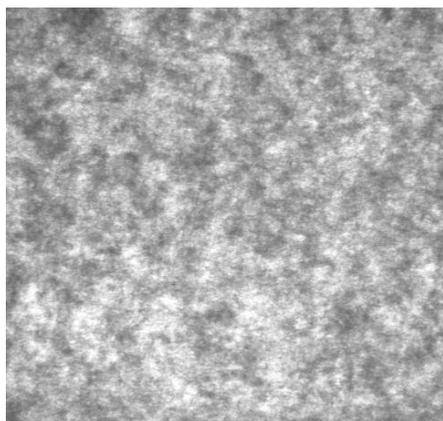


Рис. 1. Изображение образца картона топлайнер на просвет, полученное в проходящем поляризованном свете на анализаторе формирования РТИ Formation Tester (образец 120×120 мм; индекс формирования $I_f = 250$; степень анизотропии упругих свойств $TSI_{MD/CD} = 2,55$)

Fig. 1. Image of top-liner board sample obtained in transmitted polarized light by means of РТИ Formation Tester, sample of 120×120 mm (formation index $I_f = 250$, the degree of stiffness anisotropy $TSI_{MD/CD} = 2,55$)

Элементы пространственной анизотропной структуры картона во флоккулах и промоинах имеют различную жесткость и при приложении внешней нагрузки к материалу инициируют в его структуре возникновение неоднородности напряжений и деформаций. При достижении пиковых значений напряжений межволоконные или внутриволоконные водородные связи разрушают-

ся. Это приводит к возникновению необратимых деформаций и в конечном итоге к разрушению образца [11–13, 15, 16, 19].

Таким образом, принимая во внимание неоднородность и анизотропность макроструктуры картона топлайнер и связывая это с количественной оценкой неоднородности локальных напряжений и деформаций, возникающих в его структуре при приложении механической нагрузки, можно с более высокой степенью надежности предсказывать деформационное поведение картона и оптимизировать его деформационно-прочностные свойства [3, 4, 8, 17, 20, 23].

Цель нашей работы – дать количественную характеристику полей локальных деформаций, возникающих в неоднородном и анизотропном образце картона при его испытании на одноосное растяжение.

Объекты и методы исследования

Для эксперимента был использован картон для плоских слоев гофрированного картона – топлайнер двухслойный с белым верхним (покровным) слоем из первичного волокна (масса $1 \text{ м}^2 - 125 \pm 2,7 \text{ г}$; толщина – $150 \pm 2,7 \text{ мкм}$; плотность – $0,83 \pm 0,015 \text{ г/см}^3$). Покровный белый слой из 80 % лиственной и 20 % хвойной целлюлозы составляет 40 %. Для испытаний были отобраны листы картона с величиной угла TSO, близкой к нулю.

Неоднородность структуры картона топлайнер отчетливо показали изображения, полученные на анализаторе формования (рис. 1). Количественная оценка неоднородности структуры топлайнера, произведенная по этим изображениям, подтвердила наличие структурных неоднородностей различных размеров. Индекс формования по методике Teshrap [12] составил $I_\phi = 250 \pm 7$, средний размер неоднородностей – $5,2 \pm 0,3 \text{ мм}$, степень анизотропии упругих свойств, определенная ультразвуковым методом [18], $TSI_{MD/CD} = 2,55 \pm 0,11$. Таким образом, экспериментально подтверждены высокая неоднородность и анизотропия структуры топлайнера, что неизбежно должно привести к неоднородности его деформирования при растяжении.

Количественная характеристика полей растягивающих (продольных), сжимающих (поперечных) и сдвиговых локальных деформаций, возникающих и развивающихся в образце картона топлайнер при одноосном растяжении, была получена в соответствии с методикой [2, 7], основанной на использовании метода конечных элементов (МКЭ) для треугольных изопараметрических элементов [2, 5]. Ранее данная методика апробирована на образцах офисной бумаги и картона-лайнера [5, 14]. Согласно методике [2, 5], на лицевую поверхность отобранных листов с помощью струйного принтера была нанесена сетка точек (узлов) с размерами ячейки $4 \times 4 \text{ мм}$ (угол наклона сетки к машинному направлению (МД) составлял 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° соответственно для каждого листа). Из листов картона были подготовлены образцы в виде полос размерами $200 \times 25 \text{ мм}$ (25×6 узлов), вырезанные параллельно сторонам сетки. Образцы подвергались растяжению на вертикальной разрывной машине ИТС-101 со скоростью растяжения 10 мм/мин при расстоянии между зажимами 100 мм. От момента начала растяжения и до момента физического разделения образца картона на части (разрушения) производились посекундная фотофиксация процесса и регистрация кривых зависимостей «нагрузка–удлинение» [6], при математической обработке которых были определены

модуль упругости и спектр прочностных и деформационных характеристик материала [4, 6]. Фотосъемка производилась с разрешением 24 мегапикселя (6016×4016) в режиме sRGB, 24 бит со скоростью 1 кадр/с. Использована камера NIKON D600, объектив AF-S Micro-Nikkor 60/2.8, фокусное расстояние 60 мм, диафрагма $f/8$, выдержка $1/100$ с, светочувствительность ISO 1600. В результате было зафиксировано постепенное смещение узлов дискретной сетки в течение всего процесса испытания (рис. 2).

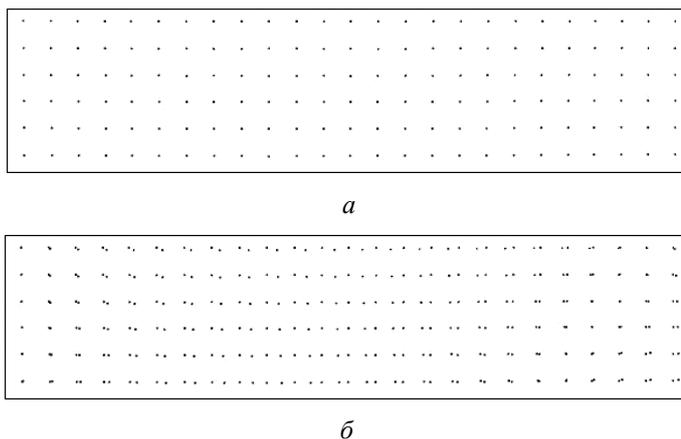


Рис. 2. Цифровой снимок образца картона с нанесенной на его поверхность дискретной сеткой точек: *a* – перед испытанием; *б* – с общей деформацией 3 мм, наложенный на снимок исходного образца

Fig. 2. Digital image of white top-liner board sample with a discrete mesh on its surface: *a* – before testing; *b* – when total deformation reached 3 mm, the stretched sample image was overlaid on the initial one

Для получения количественных данных эксперимента и визуальной интерпретации результатов их обработки было использовано программное обеспечение [7]. Смещения каждой точки (u_x , мм) по оси x (вдоль продольной оси образца), (u_y , мм) по оси y (перпендикулярно продольной оси образца) рассчитываются по величине разрешения снимков. Это дает возможность определить числовые значения продольных ε_x , поперечных ε_y и сдвиговых γ_{xy} локальных деформаций в испытываемом образце по следующим уравнениям:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = B \times U, \quad (1)$$

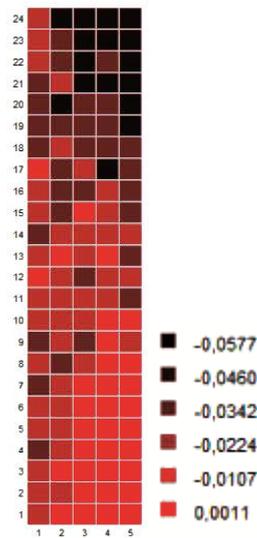
где B – матрица градиентов; U – вектор смещения точек сетки;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 - y_3 & 0 & y_3 - y_1 & 0 & y_1 - y_2 & 0 \\ 0 & x_3 - x_2 & 0 & x_1 - x_3 & 0 & x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 & y_2 - y_3 & x_1 - x_3 & y_3 - y_1 & x_2 - x_1 & y_1 - y_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 - x_1^a \\ y_1 - y_1^a \\ x_2 - x_2^a \\ y_2 - y_2^a \\ x_3 - x_3^a \\ y_2 - y_2^a \end{bmatrix}; \quad (2)$$

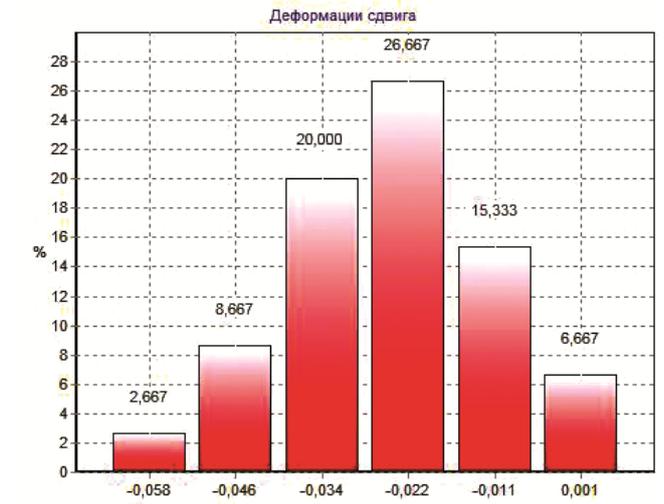
$x_i, y_i, i = 1, 2, 3$ – координаты 1, 2 и 3-го узлов конечного элемента, измеряемые до (x_i, y_i) и после (x_i^a, y_i^a) растяжения.

Результаты представляются в виде диаграммы распределения локальных деформаций и напряжений в образце при растяжении (рис. 3, а) и гистограмм их распределения (рис. 3, б).

Деформации сдвига



а



б

Рис. 3. Представление результатов обработки данных эксперимента в программе [7] в виде поля (а) и гистограммы (б) распределения локальных деформаций на примере сдвиговых γ_{xy} деформаций в образце картона, вырезанном в направлении под углом 45° к MD и растянутом до общей деформации 3 мм

Fig. 3. Presentation of results, obtained by processing of experimental data with software [7] and presented in the form of a field (а) and histogram (б) of local deformations distribution: the example of shear γ_{xy} deformations in white top-liner board sample, cut out with angle of 45° to MD and stretched up to 3 mm

Статистическая обработка полученного массива данных с определением средних и стандартных отклонений σ_x позволяет количественно охарактеризовать поля локальных деформаций. Среднее квадратическое отклонение принимается в качестве характеристики неоднородности локальных деформаций.

Результаты исследования и их обсуждение

Обобщающие результаты эксперимента, представленные на рис. 4, показывают влияние преимущественного угла ориентации волокон, изменяемого за счет вырезки образцов под разными углами к направлению MD , на развитие величины (среднего значения) и неоднородности (стандартного отклонения) локальных деформаций в образце картона топлайнер при растяжении до общей деформации 3 мм.

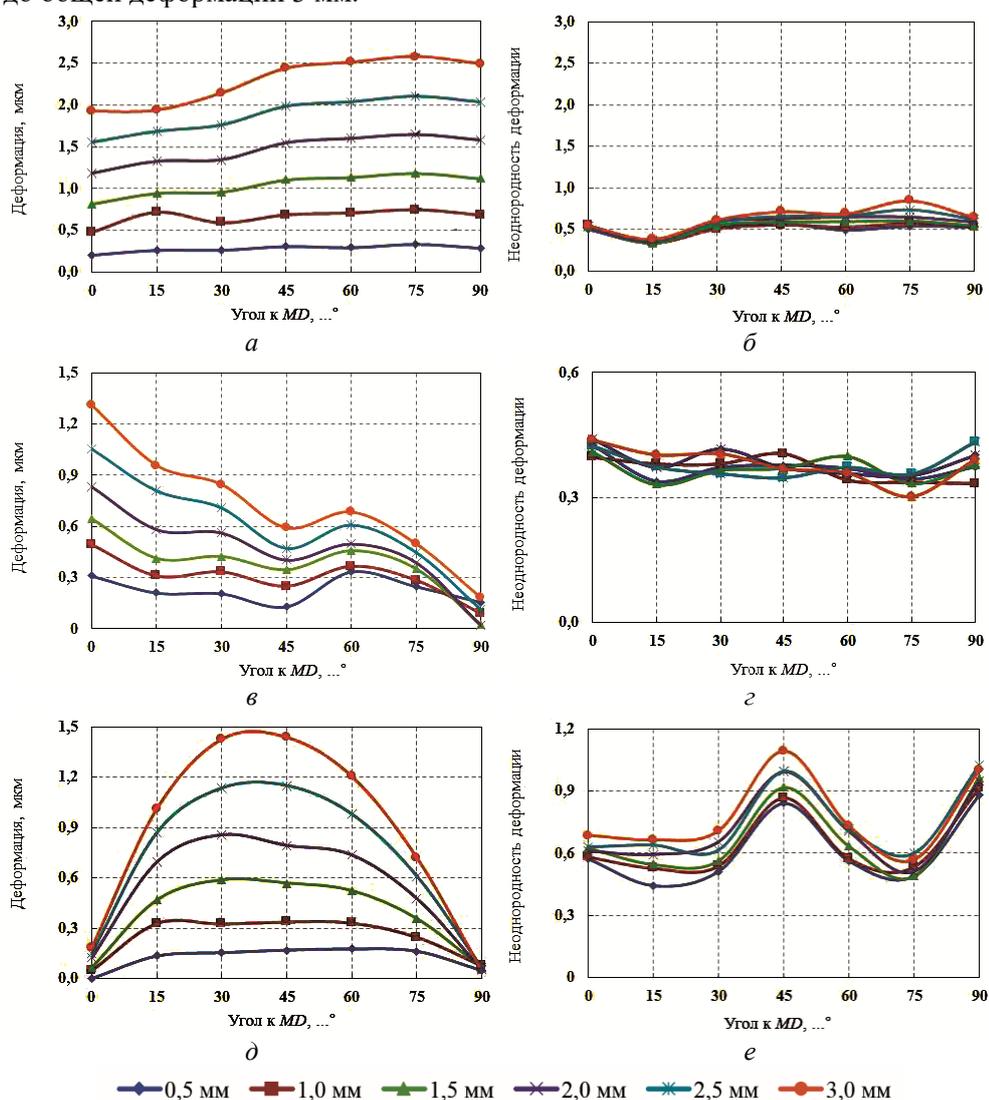


Рис. 4. Влияние преимущественного угла ориентации волокон в образцах картона топлайнер на средние значения (a , $в$, $д$) и среднее квадратическое отклонение деформаций конечных элементов ($б$, $г$, $е$) при растяжении до общей деформации 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм: a , $б$ – деформации растяжения; $в$, $г$ – деформации сжатия; $д$, $е$ – деформации сдвига

Fig. 4. The effect of a predominant angle of fibers orientation in the top-liner board samples on average deformation values (a , $в$, $д$) and standard deviation of deformations of finite elements ($б$, $г$, $е$) under tension to total deformation of 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0 mm: tensile (a , $б$), compressive ($в$, $г$) and shear ($д$, $е$) deformations

Данные подтверждают, что визуально неоднородная анизотропная структура картона деформируется неоднородно, а величина и неоднородность локальных деформаций зависят как от общей деформации образца, так и от направления ориентации волокон в образце.

Представленные на рис. 4 данные показывают, что при увеличении угла преимущественной ориентации волокон в образцах картона от направления *MD* локальные растягивающие (продольные) деформации возрастают (рис. 4, *a*); сжимающие (поперечные) – уменьшаются (рис. 4, *в*); сдвиговые – имеют максимум 45° к *MD* (рис. 4, *д*). Также наблюдается закономерный рост средней величины локальных деформаций всех видов при увеличении общей деформации образца.

Доминирование растягивающих деформаций объясняется тем, что они возникают вдоль линии нагружения. Преобладание деформаций сжатия у образцов, вырезанных в *MD* направлении, связано с тем, что сжатие происходит перпендикулярно преобладающей оси ориентации волокон в структуре, деформациям подвергаются главным образом связи между волокнами, жесткость которых существенно ниже, чем у самих волокон.

Изменение неоднородности локальных деформаций, оцениваемое по среднему квадратическому отклонению (рис. 4, *б*, *з*, *е*), имеет свои особенности. На неоднородность поперечных деформаций не оказывают влияния ни величина общей деформации, ни угол вырезки образцов (рис. 4, *з*). Неоднородность продольных деформаций растет с увеличением как общей деформации, так и угла (рис. 4, *б*), подтверждая закономерность, что чем выше величина локальных продольных деформаций, тем больше и их неоднородность.

Наличие двух максимумов для неоднородности локальных сдвиговых деформаций (рис. 4, *е*) имеет свои причины. Максимум при 45° к *MD* связан с высокими абсолютными значениями сдвиговых деформаций. Второй максимум, для образцов *CD*, наоборот, связан с чрезвычайно низкими абсолютными значениями локальных сдвиговых деформаций, когда даже незначительное их изменение вызывает большой рост среднеквадратического отклонения.

Заключение

При применении предложенной и экспериментально апробированной методики оценки локальных деформаций образца бумаги в процессе растяжения установлены величина, степень неоднородности и закономерности изменения локальных растягивающих (продольных), сжимающих (поперечных) и сдвиговых деформаций в образце топлайнера, обладающем неоднородной и анизотропной структурой, в зависимости от величины общей деформации образца и направления ориентации в нем волокон.

Экспериментально показано, что при увеличении угла преимущественной ориентации волокон в образцах картона от машинного направления (*MD*) локальные продольные деформации возрастают, поперечные уменьшаются, а сдвиговые имеют максимум 45° к *MD*.

Подтвержден рост средней величины локальных деформаций всех видов при увеличении общей деформации образца.

Установлено, что неоднородность локальных деформаций, оцениваемая по среднеквадратическому отклонению, возрастает с увеличением их абсо-

люточной величины, а тенденции изменения зависят от направления ориентации волокон в структуре образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белоглазов В.И., Гурьев А.В., Комаров В.И. Анизотропия деформативности и прочности тарного картона и методы ее оценки / под ред. проф. В.И. Комарова. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005. 252 с. [Beloglazov V.I., Gur'yev A.V., Komarov V.I. *Anisotropy of Deformability and Strength of Containerboard and the Methods of its Evaluation*. Ed. by V.I. Komarov. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2005. 252 p.].

2. Казаков Я.В. Количественная оценка неоднородности деформирования бумаги при одноосном растяжении с постоянной скоростью // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 180–185. [Kazakov Y.V. Quantitative Estimation of Deformation Heterogeneity in a Paper at Uniaxial Stretching at Constant Rate of Speed. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 2, pp. 180–185]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5a4/hpd3.pdf>

3. Казаков Я.В., Зеленова С.В., Комаров В.И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 3. С. 110–121. [Kazakov Ya.V., Zelenova S.V., Komarov V.I. Influence of Structural Nonuniformity on Stiffness Characteristics of Linerboard. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2007, no. 3, pp. 110–121]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f07/f07f469ab9b4d4a475d209e0bf17306f.pdf>

4. Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 440 с. [Komarov V.I. *Deformation and Destruction of Pulp and Paper Materials*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 440 p.].

5. Романова А.Н., Казаков Я.В., Малков А.В. Влияние направления ориентации волокна в образце картона на соотношение растягивающих, сжимающих и сдвиговых деформаций при испытании на растяжение // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы IV междунар. науч.-техн. конф. (Архангельск, 14–16 сент. 2017 г.). Архангельск: САФУ, 2017. С. 108–113. [Romanova A.N., Kazakov Y.V., Malkov A.V. The Influence of the Fiber Orientation Direction in a Cardboard Sample on the Ratio of Tensile, Compressive and Shear Deformations in the Tensile Test. *Proceedings of the 4th International Scientific Conference “The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials”*, (Arkhangelsk, September 14–16, 2017). Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017, pp. 108–113].

6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610526, Российская Федерация. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (КОМПЛЕКС): № 2001610250; заявл. 11.03.2001; опубл. 10.05.2001 / Казаков Я.В., Комаров В.И. 1 с. [Kazakov Ya.V., Komarov V.I. *The Software of the Laboratory Test Complex for the Deformability and Strength Assessment of Pulp and Paper Materials (KOMPLEX)*. Certificate of the Computer Software Official Registration No. 2001610526. 2001. 1 p.].

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617014, Российская Федерация. Программа для анализа полей локальных деформаций и напряжений в образцах бумаги при растяжении (Неоднородность деформирования): № 2014614773; заявл. 22.05.2014; опубл. 09.07.2014 / Казаков Я.В., Казакова О.Я., Рудалев А.В. 1 с. [Kazakov Ya.V., Kazakova O.Ya., Rudalev A.V. *The Software for the Analysis of Local Fields of Deformation and Stresses in Paper Samples under Tension (Deformation Inhomogeneity)*. Certificate of the Computer Program Official Registration No. 2014617014. 2014. 1 p.].

8. Borodulina S., Kulachenko A., Nygård M., Galland S. Stress-Strain Curve of Paper Revisited. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2012, vol. 27, iss. 2, pp. 318–328. DOI: [10.3183/npprj-2012-27-02-p318-328](https://doi.org/10.3183/npprj-2012-27-02-p318-328)
9. Borodulina S., Motamedian H.R., Kulachenko A. Effect of Fiber and Bond Strength Variations on the Tensile Stiffness and Strength of Fiber Networks. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, vol. 154, pp. 19–32. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2016.12.013](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.12.013)
10. Considine J.M., Scott C.T., Gleisner R., Zhu J.Y. Use of Digital Image Correlation to Study the Local Deformation Field of Paper and Paperboard. *Proceedings of the Advances in Paper Science and Technology: 13th Fundamental Research Symposium, Cambridge, September 11–16, 2005*. Cambridge, UK, The Pulp and Paper Fundamental Research Society, 2005, pp. 613–630.
11. Ebner T., Hirn U., Fischer W.J., Schmied F.J., Schennach R., Ulz M.H. A Proposed Failure Mechanism for Pulp Fiber-Fiber Joints. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 9596–9610. DOI: [10.15376/biores.11.4.9596-9610](https://doi.org/10.15376/biores.11.4.9596-9610)
12. Eymen G., Tourtollot P., Rech D. 2D F-Sensor: A New Tool for the Online Sheet Formation Characterization. *The 34th Pulp and Paper Annual Congress: ABTCP 2001, Sao Paulo, Brazil, October 22–25, 2001*. Sao Paulo, 2001, p. 7.
13. Hirn U., Lechthaler M., Bauer W. Registration and Point Wise Correlation of Local Paper Properties. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2008, vol. 23, iss. 4, pp. 374–381. DOI: [10.3183/NPPRJ-2008-23-04-p374-381](https://doi.org/10.3183/NPPRJ-2008-23-04-p374-381)
14. Kazakov Y., Romanova A., Galimzyanova A. Effect of Fiber Orientation in a Paper Sheet on Ratio of Local Tensile, Compressive and Shear Deformations at the Tensile Test. *Euromech Colloquium 592: Deformation and Damage Mechanisms of Woodfibre Network Materials and Structures, Stockholm, Sweden, June 7–9, 2017*. Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, 2017, pp. 72–73.
15. Korteoja M.J., Lukkarinen A., Kaski K., Gunderson D.E., Dahlke J.L., Niskanen K.J. Local Strain Fields in Paper. *Tappi Journal*, 1996, vol. 79, no. 4, pp. 217–224.
16. Korteoja M.J., Niskanen K.J., Kortschot M.T., Kaski K.K. Progressive Damage in Paper. *Paperi ja puu*, 1998, vol. 5, pp. 364–372.
17. Lahti J., Dauer M., Hirn U. Linking Paper Structure to Tensile Deformation and Fracture Initiation. *Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings, Darmstadt, August 22–26, 2016*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, 2016, pp. 71–75.
18. Lindblad G., Fürst T. *The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board*. Kista, Sweden, Lorentzen and Wettre, 2001. 98 p.
19. Niskanen K.J., Alava M.J., Seppala E.T., Astrom J. Fracture Energy in Fibre and Bond Failure. *Journal of Pulp and Paper Science*, 1999, vol. 25, no. 5, pp. 167–169.
20. Ostojca-Starzewski M., Castro J. Random Formation, Inelastic Response and Scale Effects in Paper. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2003, vol. 361, no. 1806, pp. 965–985.
21. Szewczyk W., Marynowski K., Tarnawski W. An Analysis of Young's Modulus Distribution in the Paper Plane. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2006, vol. 14, iss. 4(58), pp. 91–94.
22. Uesaka T. Determination of Fiber-Fiber Bond Properties. *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard. Vol. 2*. Ed by R.E. Mark. New York, Marcel Dekker Inc., 1984, pp. 379–402.
23. Wallmeier M., Linvill E., Hauptmann M. The Effect of Inhomogeneous Material Properties in Explicit Dynamic Simulation of Paperboard Forming. *Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings, Darmstadt, August 22–26, 2016*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, 2016, pp. 193–199.

**QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF LOCAL STRAIN FIELDS
IN A TOP-LINER BOARD SAMPLE UNDER UNIAXIAL TENSION**

*A.N. Romanova*¹, *Postgraduate Student*

*Ya.V. Kazakov*¹, *Doctor of Engineering, Prof.; Researcher ID: [J-4634-2012](#),*

ORCID: [0000-0001-8505-5841](#)

A.V. Malkov^{1,2}, *Candidate of Chemistry, Prof.*

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: a.romanova@narfu.ru, j.kazakov@narfu.ru, a.malkov@narfu.ru

²N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, RAS, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: a.malkov@narfu.ru

The paper presents the method for quantifying the distribution of local tensile (longitudinal), compressive (transverse) and shear strains in a sample of pulp and paper material. The results of its use for the sample of top-liner board when uniaxial tensile testing are provided. Applying this method, we have determined the values, the degree of heterogeneity and change patterns of local strains in inhomogeneous and anisotropic structure of the sample, depending on the total strain and the direction of fiber orientation. The method is based on constant-speed tensile testing of samples with a pre-applied dot matrix to their surface. The test is accompanied with photo fixing and recording a load-elongation curve. The coordinates and displacements of dots are determined by means of the specially designed software. The analysis of data and calculation of local deformations are performed by finite elements method (FEM) algorithms. The outcomes have shown that the local longitudinal deformations increased, transverse – decreased, and shear – had their maximum at 45° to machine direction (*MD*) when increasing the angle of preferential fiber orientation to *MD* in the board samples. The rise of the average absolute values of all components of local strains when increasing total deformation in the sample was confirmed. As it has been found, the heterogeneity of local strains, estimated through the standard deviation, rose when increasing their absolute value; the trends of changing depend on the fiber orientation direction in the sample structure.

For citation: Romanova A.N., Kazakov Ya.V., Malkov A.V. Quantitative Characteristics of Local Strain Fields in a Top-Liner Board Sample under Uniaxial Tension. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 180–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-180-189

Keywords: top-liner board, structural inhomogeneity, anisotropy, deformations, FEM.

Поступила 21.02.19 / Received on February 21, 2019



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 674.812.02

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-190-199

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

*Шамаев В.А., д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Y-9044-2018](#),
ORCID: [0000-0002-1762-7956](#)*

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: drevstal@mail.ru

Модифицирование древесины – распространенный метод улучшения свойств малоценной древесины мягких лиственных пород. Для повышения прочностных свойств использован метод прессования поперек волокон древесины, предварительно пластифицированной карбамидом, для улучшения антифрикционных свойств – пропитка минеральным маслом Biol. В целях увеличения теплопроводности в древесину вводят металлический никель в виде сплошной металлической пленки, выстилающей внутреннюю поверхность полостей древесины. Исследования, проведенные на растровом и прямом электронных микроскопах с образцами из каталога позволили установить следующее: карбамид находится в стенках клеток и проявляется в полостях очень резко в виде одиночных кристаллов; прессование древесины, пластифицированной карбамидом, приводит к сплющиванию анатомических элементов без их разрушения; смазка Biol при ее малом содержании растекается пленкой по стенкам клеток и не визуализируется; металлический никель присутствует в древесине в виде пленки и отдельных элементов на стенках клеток. Для него выполнены микроанализы весовой и атомный продольного среза.

Для цитирования: Шамаев В.А. Исследование модифицированной древесины методом электронной микроскопии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 190–199. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-190-199

Финансирование: Материалы исследований, представленные в данной статье, получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 11.3960.2017/4.6.

Ключевые слова: древесина, микростроение, модифицирование, электронная микроскопия.

Введение

Модифицирование древесины – самый распространенный способ улучшения свойств малоценной древесины мягких лиственных пород [4, 8, 9, 11, 13]. В зависимости от назначения это может быть улучшение консервационных и прочностных свойств, формостабильности и гидрофобности, биостойкости и др. [7, 10, 19]. В последнее время усилился интерес к модифицированной древесине как материалу для изготовления деталей трения [1, 2, 5]. Для этого древесина должна обладать высокой прочностью и износостойкостью, низким коэффициентом трения, хорошей теплопроводностью.

Во всем мире наиболее распространенным материалом для изготовления железнодорожных шпал является древесина ценных твердых лиственных

пород. После модифицирования древесина осины и березы приобретает свойства древесины твердых пород и также применяется для этих целей [15–18, 20, 21].

Наиболее эффективный способ увеличения прочности и износостойкости древесины – прессование ее с предварительной пластификацией путем пропитки водным раствором карбамида. При содержании карбамида 5...8 % от массы сухой древесины она приобретает способность к значительным деформациям без разрушения [14]. Так, при уменьшении объема древесины в 2 раза плотность прессованной древесины осины становится равной 1000 кг/м^3 , березы – 1200 кг/м^3 . Для снижения коэффициента трения используется пропитка древесины аэрозолем, содержащим смазку Biol – минеральное масло с наночастицами графита и дисульфида молибдена [12]. Коэффициент трения натуральной древесины равен 0,5, а пропитанной антифрикционной смазкой – 0,05. Чтобы увеличить теплопроводность древесину обрабатывают карбонилами металлов, например тетракарбонил никеля, при термическом разложении которого образуется металлический никель в виде сплошной пленки толщиной 0,8 мк, выстилающей внутреннюю поверхность полостей древесины [3].

Однако изменение структуры древесины в процессе модифицирования и характер распределения модификатора в древесине практически не исследованы. Между тем, опираясь на знания о микростроении древесины, полученные Фрей-Вислингом и его последователями [6, 19], можно изучить ультрамикростроение модифицированной древесины, пользуясь прямым (ПЭМ) и растровым (РЭМ) электронными микроскопами, что и явилось целью настоящего исследования.

Объекты и методы исследования

В таблице приведен каталог образцов для исследования на электронном микроскопе. Все образцы изготовлены из древесины березы (*Betula verrucosa*) и имели: влажность – 3...4 %; плотность натуральной древесины – 600 кг/м^3 .

Образцы для исследования методом РЭМ

Номер образца	Характеристика образца	Содержание модификатора, %	Примечание
1	Древесина, пропитанная стабилизатором (карбамидом)	9,0...9,5	Кристаллы
2	Прессованная древесина плотностью 1200 кг/м^3	–	Изменение геометрии клеток
3	Древесина, пропитанная маслом Biol	7,0...8,0	Капли

Исследование морфологии поверхности свежих срезов проводили на РЭМ марки JSM-6380 LV (JEOL), элементный анализ в микрообъеме – при помощи системы микроанализа на энергодисперсионном рентгеновском спектрометре марки INCA Energy 250 (фирма «Oxford Instruments») с разрешением более 137 эВ. В ходе РЭМ-исследований на поверхности образцов для устра-

нения скопления заряда формировали токопроводящий слой конденсацией углерода в установке Q150R («Quorum Technologies»).

Фазовый состав и структуру нанокристаллов изучали методом ПЭМ на электронном микроскопе Libra 120 («Carl ZEISS»). Образцы для ПЭМ, удовлетворяющие условию формирования контраста электронами с энергией 120 кэВ, изготавливали толщиной не более 100 нм на ультрамикротоме РТ-РС 75840 («RMC-Boeckeler»). Образцы дополнительно не контрастировали. Применяли следующие методики [4, 13]: анализ структуры в светло- и темнопольном режимах работы просвечивающего электронного микроскопа; анализ морфологии поверхности во вторичных электронах; выявление анизотропии адсорбции металла в отраженных электронах на РЭМ.

Режимы работы РЭМ приведены в подписи на фотографиях; SEI – вторичные электроны (режим рельефа).

Исследование образцов березы, пропитанных стабилизатором (карбамидом), при помощи РЭМ осуществляли следующим образом: выполняли срез под острым углом относительно оси роста волокон образца. Съемку проводили в режиме SEI, где программно-аппаратный комплекс микроскопа JSM-6380LV для формирования изображения регистрировал вторичные электроны, побужденные пучком монохроматических первичных электронов с указанной в информационной легенде микрофотографии энергией, т. е. карта распределения контраста во вторичных электронах отвечает визуализации рельефа. Светлые и темные участки изображения соответственно принадлежат высоким участкам и обнижениям.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены снимки с растрового электронного микроскопа при увеличении $\times 150$, $\times 500$ и $\times 1500$ (различные участки продольного среза).

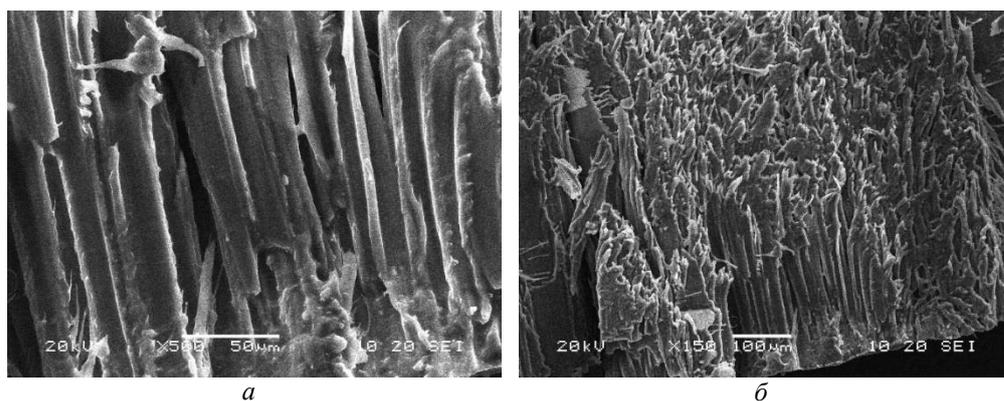


Рис. 1. Продольный срез древесины березы, пропитанной карбамидом (начало): *a* – увеличение $\times 500$; *б* – $\times 150$

Fig. 1. A longitudinal section of urea-impregnated birch wood: *a* – $500\times$; *б* – $150\times$ magnification

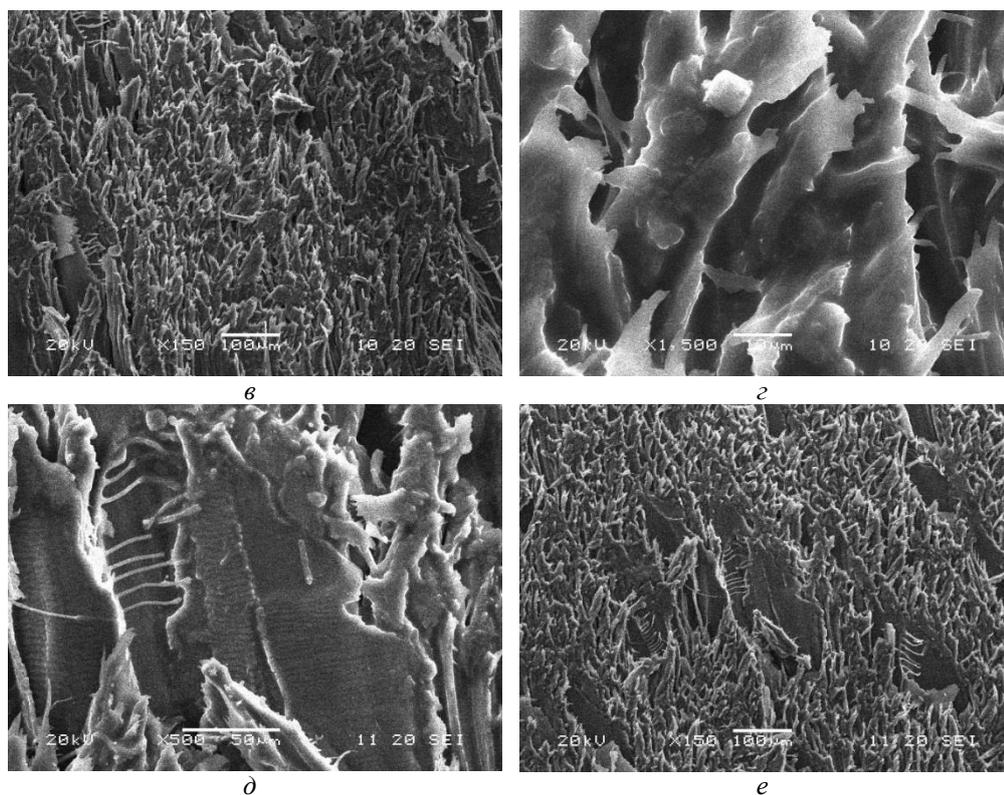


Рис. 1. Продольный срез древесины березы, пропитанной карбамидом (окончание):
в, е – увеличение $\times 150$; *д* – $\times 500$; *з* – $\times 1500$

Fig. 1. A longitudinal section of urea-impregnated birch wood: *в, е* – $150\times$;
д – $500\times$;
з – $1500\times$ magnification

Как видно из рис. 1, на всех участках отсутствуют кристаллы карбамида. Это позволяет сделать вывод, что практически весь карбамид вошел в стенки клеток и на поверхности стенок не проявляется. Наличие кристаллов выявлено методом ПЭМ-микроскопии (рис. 2).

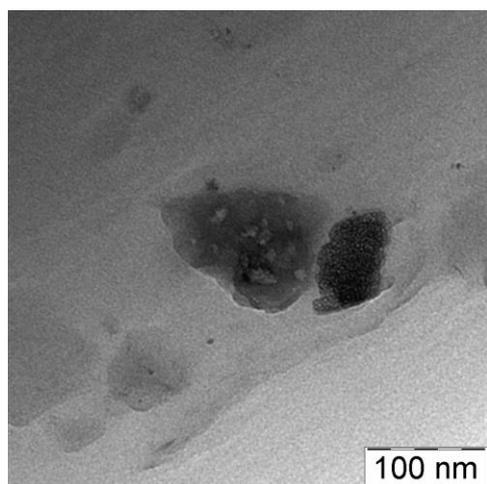


Рис. 2. ПЭМ-изображение кристаллов карбамида на поверхности древесины
 Fig. 2. Upright electron microscope image of urea crystals on wood surface

Как видно из рис. 2, скопления кристаллов проявляются в виде темных участков. Участок для съемки подготовлен при помощи ультрамикротомирования без применения контрастирования атомами тяжелых элементов.

Ствол дерева состоит из многочисленных клеток, вытянутых в основном по его длине. Клетки определенным образом группируются и создают на торце ствола систему концентрических колец. Вместе с другими элементами они формируют макроструктуру древесины.

Текстура рисунка поверхности поперечного среза волокон прессованной древесины представлена на рис. 3.

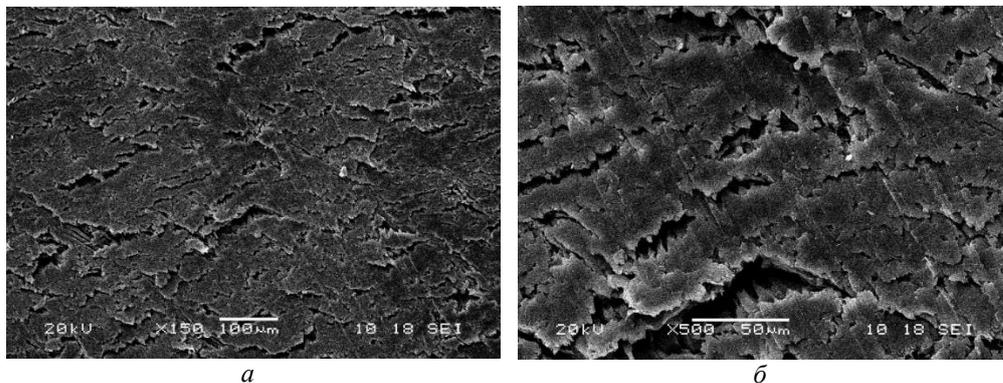


Рис. 3. Поперечный срез волокон прессованной древесины (темные участки – полости сплюснутых клеток): *a* – увеличение $\times 150$; *b* – $\times 500$

Fig. 3. Cross section of pressed wood fibers (dark areas – cavities of squashed cells): *a* – $150\times$; *b* – $500\times$ magnification

Как видно из рис. 3, строение прессованной древесины резко отличается от строения натуральной [20]. Оно становится более однородным, сосуды и клетки сплюснены в направлении прессования. Возросшая плотность значительно влияет на свойства древесины, особенно на ее прочность. Истинная плотность древесины изменяется в очень узких пределах, так как древесинное вещество состоит в основном из целлюлозы. Уменьшение объема полостей клеток пор пропорционально изменению плотности образца.

Немалый интерес представляет выявление масла Biol в древесине в условиях его малого присутствия (8 %). На рис. 4 показаны участки продольного среза. Из-за особенностей поведения образца в условиях вакуума в колонне РЭМ и физики капиллярных эффектов масло не выявляется, т. е. его вытягивает из древесины вакуум.

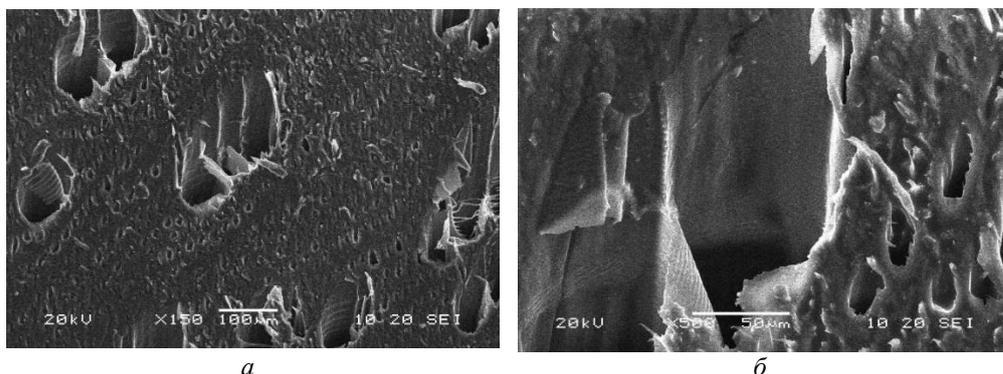


Рис. 4. РЭМ-изображение продольного среза образца с маслом Biol в режиме регистрации вторичных электронов (начало): *a* – увеличение $\times 150$; *b* – $\times 500$

Fig. 4. Scanning electron microscope (SEM) image of a longitudinal section of a sample with Biol oil in the registration mode of secondary electrons: *a* – $150\times$; *b* – $500\times$ magnification

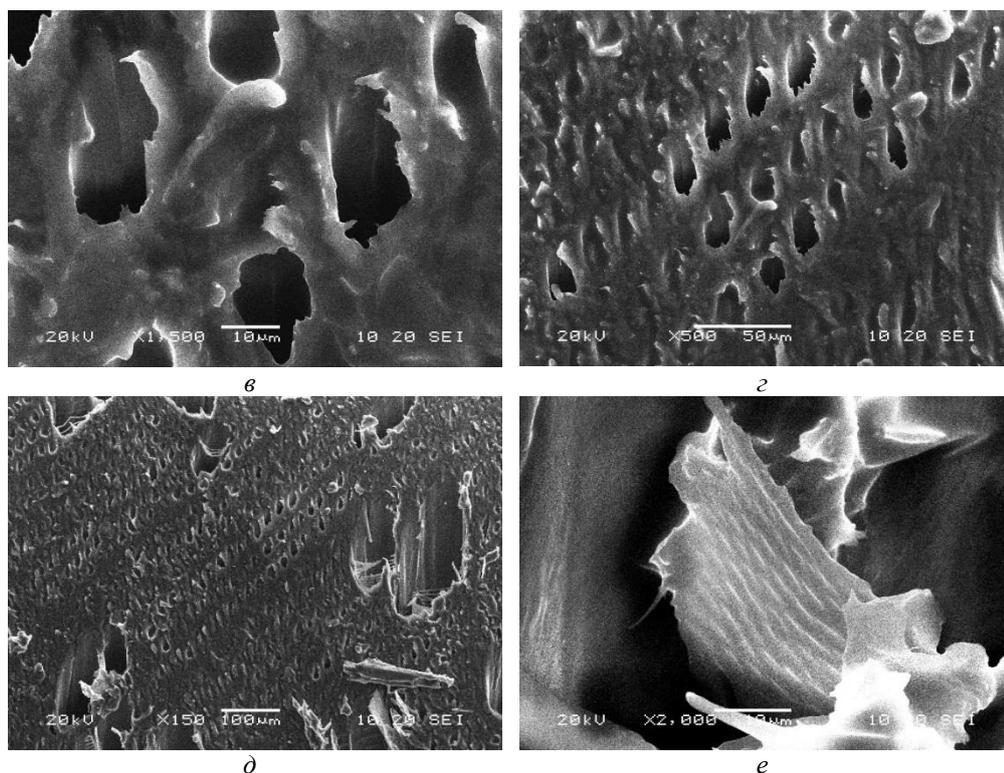


Рис. 4. РЭМ-изображение продольного среза образца с маслом Biol в режиме регистрации вторичных электронов (окончание): *а* – увеличение $\times 1500$; *б* – $\times 500$; *в* – $\times 150$; *г* – $\times 2000$

Fig. 4. Scanning electron microscope (SEM) image of a longitudinal section of a sample with Biol oil in the registration mode of secondary electrons: *а* – $1500\times$; *б* – $500\times$; *в* – $150\times$; *г* – $2000\times$ magnification

На поперечном (торцевом) разрезе образца березы, пропитанного маслом Biol (рис. 5), видны отверстия сечения сосудов – трубок и каналов, предназначенных для проведения воды. Крупные сосуды расположены в ранней древесине годовичных слоев и на поперечном разрезе образуют сплошное кольцо из сосудов.

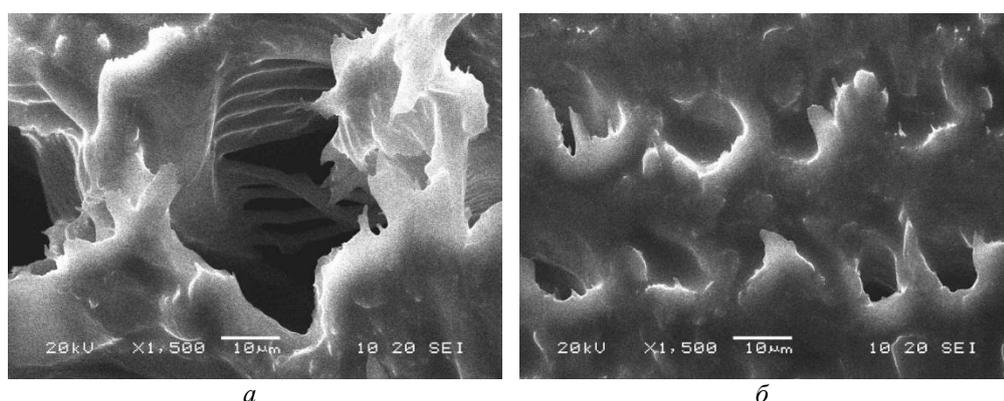


Рис. 5. РЭМ-изображение поперечного среза образца с маслом Biol в режиме регистрации вторичных электронов (начало): *а*, *б* – увеличение $\times 1500$

Fig. 5. SEM-image of a cross section of a sample with Biol oil in the registration mode of secondary electrons: *а*, *б* – $1500\times$ magnification

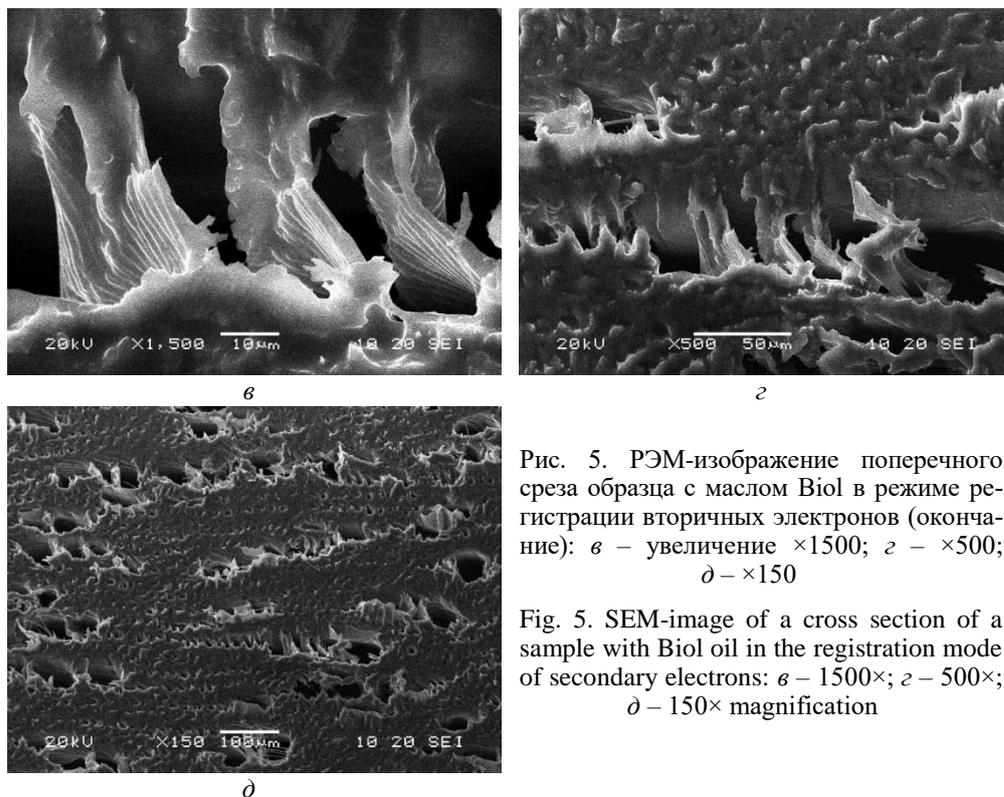


Рис. 5. РЭМ-изображение поперечного среза образца с маслом Biol в режиме регистрации вторичных электронов (окончание): *а* – увеличение $\times 1500$; *б* – $\times 500$; *д* – $\times 150$

Fig. 5. SEM-image of a cross section of a sample with Biol oil in the registration mode of secondary electrons: *а* – $1500\times$; *б* – $500\times$; *д* – $150\times$ magnification

Аналогичные результаты получены для прессованной древесины, пропитанной маслом Biol (рис. 6).

Визуализация присутствия масла методом РЭМ в каналах древесины затруднена из-за атомно-однородного с древесиной состава и равномерного растекания слоя масла Biol в микроканалах.

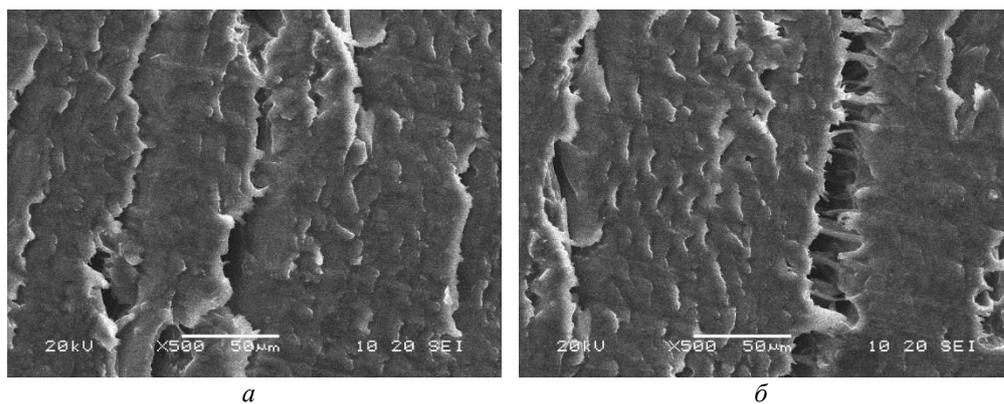


Рис. 6. РЭМ-изображение поперечного среза образца спрессованной древесины с маслом Biol в режиме регистрации вторичных электронов (начало): *а*, *б* – увеличение $\times 500$

Fig. 6. SEM-image of a cross section of a sample of pressed wood with Biol oil in the registration mode of secondary electrons: *а*, *б* – $500\times$ magnification

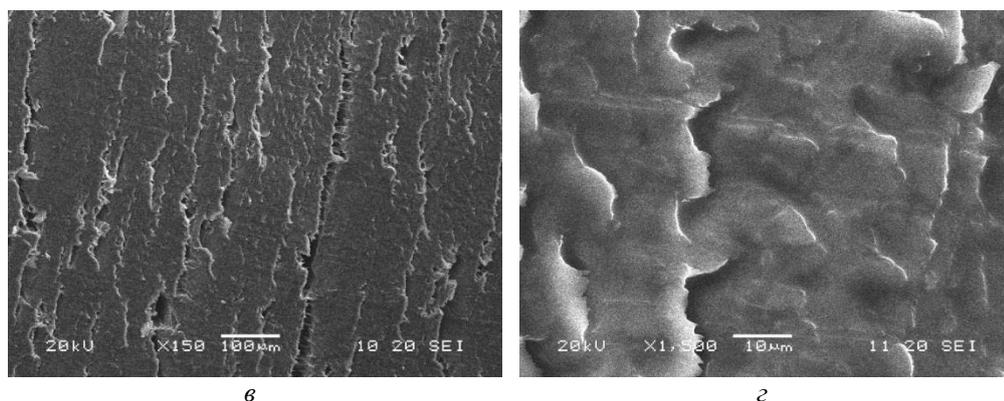


Рис. 6. РЭМ-изображение поперечного среза образца спрессованной древесины с маслом Biol в режиме регистрации вторичных электронов (окончание): б – $\times 150$; з – $\times 1500$

Fig. 6. SEM-image of a cross section of a sample of pressed wood with Biol oil in the registration mode of secondary electrons: б – $150\times$; з – $1500\times$ magnification

Таким образом, растекание масла Biol можно показать за счет прямого наблюдения наночастиц в режиме отраженных электронов, которыми следует его подкрашивать, или оценивать расчетом модели по коэффициенту смачивания древесины маслом и проходимости в микроканалах в сравнении с наблюдаемым поглощенным объемом масла в образцах.

Выводы

1. Исследование модифицированной древесины на растровом и прямом электронных микроскопах позволило выявить наличие нанокристаллов стабилизатора (карбамида) в древесине.
2. Установлено, что при прессовании древесины поперек волокон крупные сосуды сплющиваются, клетки волокон либриформа приобретают форму эллипса, разрывов тканей и трещин не наблюдается.
3. Масло Biol в древесине не обнаружено из-за его эмиссии из древесины в условиях вакуума при работе на растровом и прямом электронных микроскопах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Патент № 2339505 Российская Федерация, МПК В27К 5/06, С23С 16/16. Способ модификации древесины / Шамаев В.А., Уэльский А.А., Гребенников А.В., Стороженко П.А., Рахманов В.Г. [Shamaev V.A., Uehl'skij A.A., Grebennikov A.V., Storozhenko P.A., Rakhmanov V.G. *Method of Wood Modification*. Patent RF, no. 2339505, 2008].
2. Патент № 2539022 Российская Федерация, МПК F16C 17/12, F16C 33/12, F16C 33/18. Подшипник скольжения и способ изготовления / Шамаев В.А., Медведев И.Н., Галаворян Р.А., Манаев В.А. [Shamaev V.A., Medvedev I.N., Galavorjan R.A., Manaev V.A. *Plain Bearing and Method of Its Manufacture*. Patent RF, no. 2539022, 2015].
3. Шамаев В.А. Подшипники скольжения из модифицированной древесины // Вестн. машиностроения. 2010. № 7. С. 45–48. [Shamaev V.A. Bearings of Modified Wood. *Vestnik mashinostroyeniya* [Russian Engineering Research], 2010, no. 7, p. 45–48].

4. Шамаев В.А., Медведев И.Н. Модифицированная древесина нового поколения для деталей трения // Полимерные композиты и трибология (ПоликомТриб–2011): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, Беларусь, 27–30 июня 2011 г. Гомель: ИММС НАНБ, 2011. С. 225–226. [Shamaev V.A., Medvedev I.N. Modified Wood of New Generation for Friction Parts. *Polymer Composites and Tribology (POLICOMTRIB-2011): Abstracts of the International Scientific and Technical Conference, Gomel, Belarus, June 27–30, 2011*. Gomel, IMMS NANB Publ., 2011, pp. 225–226].
5. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины. М.: Флинта, Наука, 2013. 448 с. [Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Modification of Wood*. Moscow, Nauka Publ., 2013. 448 p.].
6. Dykstra M.J., Reuss L.E. *Biological Electron Microscopy: Theory, Techniques, and Troubleshooting*. Springer US, 2003. 534 p. DOI: [10.1007/978-1-4419-9244-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9244-4)
7. Igaz R., Macek Š., Zemiar J. The Influence of Unidirectional Cyclic Bend Loading on Initial Relaxation Speed of Beech Lamellas. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2014, vol. 56, pp. 27–35.
8. Kúdela J., Rešetka M. Influence of Pressing Parameters on Dimensional Stability and Selected Properties of Pressed Beech Wood. I. Dimensional Stability and Density. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2012, vol. 54(1), pp. 15–24.
9. Lekounougou S., Kocaefe D., Oumarou N., Kocaefe Y., Poncsak S. Effect of Thermal Modification on Mechanical Properties of Canadian White Birch (*Betula papyrifera*). *International Wood Products Journal*, 2011, vol. 2, iss. 2, pp. 101–107. DOI: [10.1179/2042645311Y.0000000016](https://doi.org/10.1179/2042645311Y.0000000016)
10. Maunsbach A.B., Afzelius B.A. *Biomedical Electron Microscopy: Illustrated Methods and Interpretations*. London, Academic Press, 1998. 548 p.
11. Medvedev I.N., Shamayev V.A., Parinov D.A. Resource-Saving Production Sleepers of Modified Wood. *Put' i putevoye khozyaystvo* [Railway Track and Facilities], 2018, no. 11, pp. 30–32.
12. *Proceedings of IUFRO Meetings in 2006: The 5th International Symposium on Wood Structure and Properties, Sliak, Slovakia, September 3–6, 2006*. Ed. by S. Kurjatko, J. Kúdela, R. Lagana. Zvolen, Slovakia, Arbora Publishers, 2006. 522 p.
13. Sandberg D., Haller P., Navi P. Thermo-hydro and Thermo-hydro-mechanical Wood Processing: An Opportunity for Future Environmentally Friendly Wood Products. *Wood Material Science & Engineering*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 64–88. DOI: [10.1080/17480272.2012.751935](https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935)
14. Shamaev V., Medvedev I., Parinov D. Study of Modified Wood as a Bearing Material for Machine-Building. *Proceedings of the International Conference "Aviamechanical Engineering and Transport (AVENT 2018)*. 2018, vol. 158, pp. 478–482. DOI: [10.2991/avent-18.2018.92](https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.92)
15. Shamaev V., Medvedev I., Parinov D., Shakirova O., Anisimov M. Investigation of Modified Wood as a Material Power Transmission Pole Produced by Self-Pressing Method. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2018, vol. 60(2), pp. 25–32. DOI: [10.17423/afx.2018.60.2.02](https://doi.org/10.17423/afx.2018.60.2.02)
16. Shamaev V., Parinov D., Medvedev I. Wood Modification by Pressing. *Engineering Studies*, 2018, vol. 10, iss. 3(2), pp. 708–718.
17. Šmidriaková M., Kollár M. Modification of Resorcinol Adhesives with Biopolymers for Gluing of Wood with Higher Moisture Content. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2011, vol. 53(1), pp. 33–41.
18. *The Official Website of Accoya Company*. Available at: <https://www.accoya.com/> (accessed 23.05.19).
19. Tshabalala M.A., McSweeney J.D., Rowell R.M. Heat Treatment of Wet Wood Fiber: A Study of the Effect of Reaction Conditions on the Formation of Furfurals. *Wood Material Science & Engineering*, 2012, vol. 7, iss. 4, pp. 202–208. DOI: [10.1080/17480272.2012.669406](https://doi.org/10.1080/17480272.2012.669406)

20. Wagenführ R., Scheiber C. *Holzatlas*. Leipzig, WEB Fachbuchverlag, 1989. 720 S.

21. Wahyudi I., Ishiguri F., Makino K., Tanabe J., Tan L., Tuhumury A. et al. Growth Characteristics and Wood Properties of 26-Year-Old *Eucalyptus alba* Planted in Indonesia. *International Wood Products Journal*, 2015, vol. 6, iss. 2, pp. 84–88. DOI: [10.1179/2042645315Y.0000000003](https://doi.org/10.1179/2042645315Y.0000000003)

STUDY OF MODIFIED WOOD BY ELECTRON MICROSCOPY

V.A. Shamaev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Y-9044-2018](https://orcid.org/0000-0002-1762-7956),

ORCID: [0000-0002-1762-7956](https://orcid.org/0000-0002-1762-7956)

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: drevstal@mail.ru

Wood modification is a popular method for improvement of wood properties of low-value deciduous species. The method of pressing across the wood fibers preliminarily plasticized with urea was used in order to increase the strength properties. Impregnation with Biol mineral oil was used for the improvement of anti-friction properties. Metallic nickel is introduced into wood in the form of a continuous metal film lining the inner surface of wood cavities for thermal conductivity increasing. Studies carried out with the listed catalog samples using scanning and upright electron microscopes allowed to find, that: carbamide is located in the walls of cells and manifests itself in the cavities very sharply in the form of single crystals; pressing of wood plasticized with urea leads to flattening of anatomical elements without their destruction; Biol oiling with its low content spreads as a film on the cell walls and is not visualized; metallic nickel is present in wood in the form of film and individual elements on the cell walls. Weight and atomic microanalyses of the longitudinal section were performed for it.

For citation: Shamaev V.A. Study of Modified Wood by Electron Microscopy. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 190–199. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-190-199

Funding: The research materials presented in the article were obtained within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 11.3960.2017/4.6.

Keywords: wood, microstructure, modification, electron microscopy.

Поступила 23.05.19 / Received on May 23, 2019

УДК 676.038.14+676.038.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208

УПРУГО-РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ И ИХ РОЛЬ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ДРЕВЕСНЫХ И ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ

А.А. Пекарец¹, аспирант

О.А. Ерохина², зав. лаб.

В.В. Новожилов², магистр

Ю.Г. Мандре², д-р техн. наук

Э.Л. Аким², д-р техн. наук, проф.

¹ООО «Лесная технологическая компания», ул. Звездочка, д. 1, пос. Качуг, Иркутская область, Россия, 666210; e-mail: esrplus@yandex.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; e-mail: art-stones@bk.ru

Переработка опилок, на долю которых приходится 10...12 % от объема перерабатываемого древесного сырья в продукцию с высокой добавленной стоимостью, является одним из направлений биорефайнинга древесины. Это предпосылка их переработки в биотопливо второго поколения – остеклованные брикеты, а также карбонизированные брикеты на их основе. Учитывая специфические особенности релаксационных переходов на стадиях получения древесных и древесно-угольных брикетов, изучены релаксационные свойства древесины лиственницы и проанализирована их роль в технологическом процессе, осуществляемом при создании биотоплива нового поколения с заданным комплексом эксплуатационных свойств. Рассмотрена взаимосвязь направленного изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины (лигнина, целлюлозы, гемицеллюлоз) и технологических параметров процесса. В исходной древесине и древесных опилках целлюлоза и гемицеллюлозы находятся в высокоэластическом состоянии, что подтверждается полученными экспериментальными данными. Для измельчения древесных опилок до порошкообразного состояния при минимальном расходе энергии целесообразно обеспечить перевод полимерных компонентов древесины ниже температуры хрупкости, т. е. осуществить сушку древесины до минимально-возможной остаточной влажности. Последующее увлажнение паром до влажности 3...4 % придает системе экструдированность за счет образования на поверхности древесных частиц гемицеллюлозного геля.

Для цитирования: Пекарец А.А., Ерохина О.А., Новожилов В.В., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208

Ключевые слова: биорефайнинг древесины, древесина лиственницы, биотопливо, древесные брикеты, древесно-угольные брикеты, пеллеты, физико-механические свойства, релаксационные свойства.

Введение

За последние 20 лет в мире создано новое направление переработки в лесном комплексе – биорефайнинг древесины [2, 18, 21, 24–26] с производством биотоплива второго поколения. Объем мирового производства древесных пеллет и брикетов в 2018 г. достиг 30 млн т [18]. В материалах Лесного комитета Европейской экономической комиссии ООН и ФАО ООН приведено

описание ситуации с древесным топливом [18, 20–22, 24–26], в частности с древесным углем, который для многих африканских стран является основным видом топлива [24]. Такая же подотрасль создана и в России, причем ни по одному другому направлению лесного сектора наша страна не занимает столь заметного места на мировом рынке, как по экспорту пеллет и брикетов, – 1,5...1,8 млн т/год. Однако эти производства базируются на импортном оборудовании и технологиях. В последнее время в России развернулись исследования, связанные с получением твердого биотоплива второго поколения [3–9, 14].

Особое место в производстве биотоплива второго поколения занимает разработанная и реализованная в России [2, 10–13, 16, 17, 19] инновационная аэродинамическая релаксационная технология получения древесных брикетов (ДБ) и древесно-угольных брикетов (ДУБ), которая защищена 4 патентами Российской Федерации [10–13]. Опытно-промышленная линия по этой технологии в Иркутской области работает с 2015 г., к настоящему времени в России уже имеется 5 таких линий. В ближайшее время в Риге начинается серийное производство оборудования для производства брикетов по этой технологии.

Теоретической основой для данной технологии является концепция об определяющей роли релаксационных состояний полимерных компонентов древесины при ее биорефайнинге [2, 16, 17]. Важное место в этой инновационной технологии занимают процессы сжатия древесины, точнее измельченных до порошкообразного состояния древесных опилок и других древесных отходов. Существует ряд работ по исследованию сжатия древесины и древесных отходов [9, 15, 23].

Цель исследования – изучение упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы с использованием метода одноосного сжатия как модели процессов, происходящих при получении древесных и древесно-угольных брикетов.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали модельные кубики из древесины лиственницы. При этом процессы сжатия были смоделированы путем длительного нагружения модельных кубиков размером $20 \times 20 \times 20$ мм в режиме одноосного сжатия с последующим эластическим восстановлением их формы при нагрузках $P = 1500; 2500; 3500; 4500$ Н и продолжительности действия нагрузок $t = 1; 10; 100; 1000$ мин на универсальной испытательной установке «ИНСТРОН-1121» при постоянной скорости деформирования $V = 100$ мм/мин [1]. Остаточную деформацию измеряли после снятия нагрузки и эластического восстановления формы образца. Продолжительность эластического восстановления, подобранная в ходе эксперимента, изменялась от 10 до 1000 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Механизм процессов, происходящих при получении из древесных опилок топливных древесных и древесно-угольных брикетов, с позиций структурной физикохимии древесины рассмотрен в предыдущих статьях [2, 16, 17], где было показано, что формирование структуры древесных брикетов плотностью до 1300 кг/м^3 на различных стадиях технологического процесса сопро-

вождается рядом релаксационных явлений. В данной работе рассмотрено поведение в технологическом процессе составляющих компонентов древесного брикета на стадии сжатия.

На рис. 1 представлена типичная кривая сжатия–разгрузки в радиальном направлении образца из древесины лиственницы.

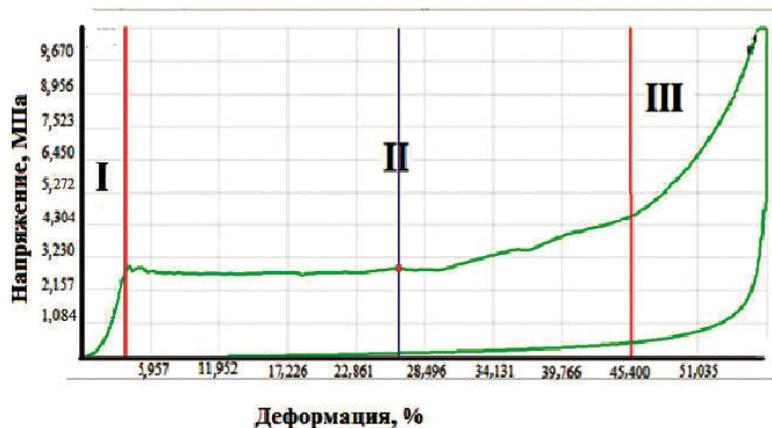


Рис. 1. Диаграмма сжатия–разгрузки до $P = 4500$ Н образца из древесины

Fig. 1. Diagram of compression-discharge up to $P = 4500$ N of a wood sample

Как видно из рис. 1, кривая сжатия имеет 3 характерные области: I – упругая; II – эластическая; III – вынужденно-эластическая. Область I соответствует деформация до 4 %. При дальнейшем сжатии образца происходит переход материала из упругого в высокоэластическое состояние, о чем свидетельствует первый пик на кривой, отображающий релевантную (значимую) нагрузку, необходимую для его деформирования. Экспериментально установлено, что этот пик связан с началом выделения жидкого экстракта из древесины лиственницы. При дальнейшем сжатии образца с увеличением деформации происходит незначительное изменение нагрузки (область II). Это характерно для образцов из древесины лиственницы (заболонь с высокой влажностью 40 %) при сжатии в радиальном направлении и связано, вероятно, со сложением слоев и выделением жидкого компонента – комплекса «арабиногалактан–вода» [2, 16, 17, 19]. В области III наблюдается значительный подъем напряжения с увеличением деформации, что характерно для значительного накопления необратимых деформаций. Полученные нами результаты подтверждают данные более ранних работ [3, 9, 15, 23] для древесины различных пород, однако указывают на специфические особенности древесины лиственницы.

Физико-механические характеристики исследуемых образцов древесины лиственницы:

Плотность при исходной влажности	0,88 г/см ³
Деформация при $P = 4500$ Н.....	56,7 %
Максимальная нагрузка	4500 Н
Модуль упругости.....	60...70 МПа
Работа при сжатии до $P = 4500$ Н	40 Дж·м/м ³
Влажность.....	36...42 %

На рис. 2 представлены кривые релаксации напряжений во времени образцов древесины лиственницы при различной величине деформаций, на рис. 3 – накопление остаточной деформации во времени.

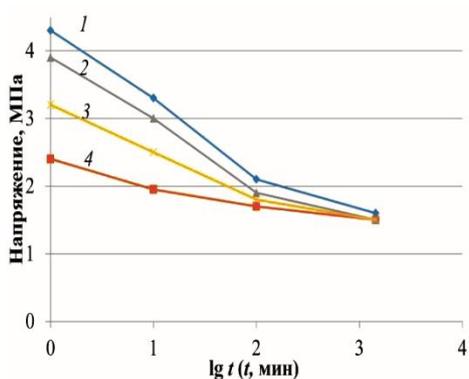


Рис. 2. Релаксация напряжения во времени у образцов древесины лиственницы при различных значениях P , Н: 1 – 4500; 2 – 3500; 3 – 2500; 4 – 1500

Fig. 2. Stress relaxation over time in larch wood samples under various values of P (N): 1 – 4500; 2 – 3500; 3 – 2500; 4 – 1500

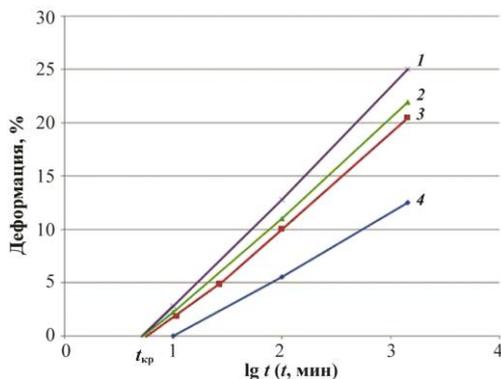


Рис. 3. Накопление остаточной деформации во времени у образцов древесины лиственницы при различных значениях P , Н (скорость деформирования образца $V_d = 100$ мм/мин): 1 – 4500; 2 – 3500; 3 – 2500; 4 – 1500

Fig. 3. Accumulation of residual deformation over time in larch wood samples at various values of P (N) (sample deformation rate $V_d = 100$ mm/min): 1 – 4500; 2 – 3500; 3 – 2500; 4 – 1500

Как видно из рис. 2 и 3, с увеличением задаваемой деформации возрастают напряжение, скорость релаксационного процесса и значения остаточной компоненты деформации. Это связано с тем, что под действием нагрузки и времени ее действия наблюдается ряд процессов, влияющих на изменение структуры: послойное сжатие волокон древесины лиственницы с выделением жидкой фракции; накопление вынужденно-эластической (остаточной) компоненты деформации.

В результате экстраполяции на ось времени (рис. 3) получим точку $t_{кр}$ – критическое время, при котором в образце древесины лиственницы начинают накапливаться необратимые компоненты деформации.

Измерения показали, что после действия на образец древесины лиственницы задаваемой деформации в течение времени до $t_{кр}$ происходит полное восстановление формы образца (рис. 3). В процессе длительных нагрузок при $t > t_{кр}$ развиваются вынужденно-эластические деформации, которые при температуре 20 °С на воздухе не восстанавливаются. Экспериментально установлено, что в исследуемых диапазонах нагрузок и времени их действия в образце развиваются деформации, которые практически полностью восстанавливаются при его погружении в воду на 1 сут.

В таблице приведены составляющие компонент деформации при $P = 4500$ Н.

**Зависимость составляющих компонент деформации
у образцов древесины лиственницы от продолжительности действия нагрузки**

Время t , мин	Деформация, %			
	заданная	упругая	эластическая	остаточная
10	56,7	3,6	50,1	3,0
100	56,7	3,6	40,1	13,0
1000	56,7	3,6	28,1	25,0

Из данных таблицы видно, что с увеличением продолжительности действия нагрузки величина эластической компоненты деформации уменьшается за счет внутренних изменений структуры и накопления остаточной компоненты деформации. На рис. 4 представлена кривая изменения плотности во времени после снятия нагрузки $P = 4500$ Н. Такое изменение плотности характерно для материалов с высокими упругими и эластическими свойствами.

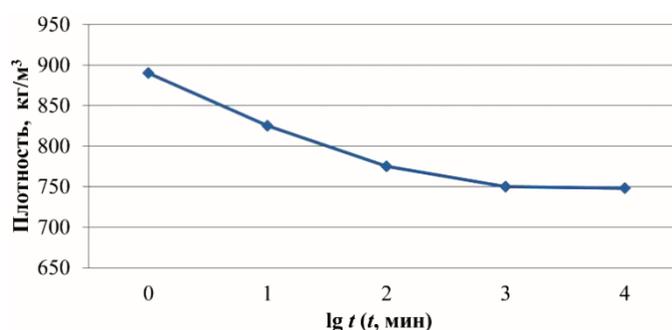


Рис. 4. Изменение плотности образца древесины лиственницы после снятия нагрузки $P = 4500$ Н

Fig. 4. Change in density of a larch wood sample after unloading $P = 4500$ N

Таким образом, для древесины лиственницы естественной влажности характерны упруго-релаксационные свойства, типичные для полимерных объектов, находящихся в высокоэластическом состоянии. Измельчение объектов до порошкообразного состояния является очень энергоемким процессом. В то же время известно, что хрупкое измельчение полимерных объектов значительно менее энергоемко.

Как уже указывалось выше, в настоящее время наиболее перспективным инновационным методом утилизации отходов древесины лиственницы считается изготовление древесно-угольных брикетов на основе опилок [2, 10, 11, 13, 17, 21]. Инновационная технология получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины (в том числе лиственницы) базируется на направленном изменении релаксационного состояния полимерных компонентов древесины (лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз) [2, 16, 17, 19]. Она позволяет превратить древесные отходы в древесно-угольный брикет без использования связующих веществ при минимальном расходе энергии и приемлемых капитальных затратах.

Соответственно, для измельчения древесных опилок до порошкообразного состояния, целесообразно осуществить сушку древесины до минимально-возможной остаточной влажности, т. е. обеспечить перевод полимерных

компонентов древесины не просто в стеклообразное состояние, а ниже температуры хрупкости. Именно такая операция предлагается в патентах [10–13], что позволяет провести процесс хрупкого измельчения при минимальном расходе энергии. Специфика инновационной аэродинамической технологии заключается в том, что частицы древесины, измельченной в стеклообразном состоянии при остаточной влажности около 1 % до дисперсности древесной муки, увлажняются паром до влажности 3...4 %. В этом случае значительную роль играет и градиент влажности по толщине частиц. При сушке до остаточной влажности 1 % и менее на поверхности частиц опилки находятся практически абсолютно сухие слои древесного вещества, которые и отделяются от «тела» частиц при их соударениях в аэродинамическом потоке. В процессе последующего увлажнения водяным паром до 3...4 % имеется противоположная картина – на поверхности частиц находятся максимально увлажненные слои, например в виде гемицеллюлозного геля [2, 16, 17, 19], которые и придают системе экструдированность. В случае опилок древесины лиственницы эти поверхностные слои вообще могут представлять собой аквакомплекс «арабиногалактан–вода», находящийся в вязко-текучем состоянии в широчайшем температурном диапазоне. В последующем система испытывает в экструдере очень большие усилия на сжатие и сдвиг, приводящие не только к ее переводу в вынужденно-пластическое состояние, но и к переходу системы от максимальной к минимальной ньютоновской вязкости. Именно благодаря этим факторам удается получить древесный брикет плотностью до 1300 кг/м³. По имеющимся у нас данным, никакой другой метод пока не позволяет в промышленных условиях достигать таких значений плотности. Исследования позволяют экстраполировать изученные на модели в условиях одноосного сжатия упруго-релаксационные свойства исходной древесины на процессы, реально протекающие при измельчении опилок и в экструдере.

Выводы

1. Для древесины лиственницы в условиях одноосного сжатия выявлена типичная картина развития упругих и высокоэластических деформаций; показана взаимосвязь между нагрузкой, продолжительностью ее действия и величиной остаточной деформации; определены условия, при которых происходит полное восстановление формы образца.

2. Установлено, что снятие вынужденно-эластических деформаций возможно после воздействия воды.

3. Полученные данные могут быть использованы при отработке технологических параметров формования древесных брикетов экструзионным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аким Э.Л., Коваленко М.В., Рассказова Н.Я., Васильев В.В., Ерохина О.А., Бучельникова Я.В., Мандре Ю.Г. Проект «Лиственница». Программно-аппаратный комплекс для изучения свойств древесины лиственницы // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2011. № 5. С. 24–28. [Akim E.L., Kovalenko M.V., Rasskazova N.Ya., Vasil'yev V.V., Erokhina O.A., Buchel'nikova Y.V. The Larch Project. Hardware and Software Package for Studying the Properties of Larch Wood. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Board], 2011, no. 5, pp. 24–28].

2. Аким Э.Л., Мандре Ю.Г., Пекарец А.А. Изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при проведении ее высокотемпературного биорефининга // Химические волокна. 2019. № 3. С. 14–18. [Akim E.L., Mandre Yu.G., Pekarets A.A. Change in the Relaxation State of Polymeric Components of Wood during High Temperature Biorefining. *Khimicheskiye volokna* [Fibre Chemistry], 2019, no. 3, pp. 14–18].

3. Виноградов Н.В. Компрессионные свойства древесины лиственницы какоснова отжимной технологии извлечения арабиногалактана: автореф. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 16 с. [Vinogradov N.V. *Compression Properties of Larch Wood as the Basis for Squeezing Technology of Arabinogalactan Extraction*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, SPbGUPTD, 2019. 16 p.].

4. Голубев В.А. Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2014. 16 с. [Golubev V.A. *Substantiation and Improvement of Methods for the Energy Use of Vegetation Residues*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Barnaul, 2014. 16 p.].

5. Кашин Е.М. Разработка газогенераторов роторного исполнения для древесного топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2019. 16 с. [Kashin E.M. *Development of Rotary Gas Generators for Wood Fuel*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Kazan, 2019. 16 p.].

6. Лесная биоэнергетика / под ред. Ю.П. Семенова. М.: МГУЛ, 2008. 348 с. [Forest Bioenergy. Ed. by Yu.P. Semenova. Moscow, MGUL Publ., 2008. 348 p.].

7. Любов В.К. Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем повышения эффективности сжигания топлив и вовлечения в энергетический баланс отходов переработки биомассы и местного топлива: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2004. 44 с. [Lyubov V.K. *Improving the Fuel and Energy Complex by Increasing the Efficiency of Fuel Combustion and Involving Biomass and Local Fuel Wastes into the Energy Balance*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2004. 44 p.].

8. Марьяндышев П.А. Совершенствование технологии энергетического использования древесного биотоплива: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 16 с. [Mar'yandyshchev P.A. *Improving the Technology of Energy Use of Wood Biofuel*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs., Saint Petersburg, 2015. 16 p.].

9. Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Любов В.К., Тюрикова Т.В. Математическая модель процесса формирования древесных гранул // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 2. С. 104–122. [Myuller O.D., Melekhov V.I., Lyubov V.K., Tyurikova T.V. Mathematical Model of Wood Granules Formation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 2, pp. 104–122]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.2.104](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.2.104); URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c41/1- -myuller.pdf>

10. Патент № 2596683 Российская Федерация, МПК F26B 20/00, F26B 17/10, F26B 3/10. Комплекс для непрерывной термообработки твердых мелких частиц, преимущественно дисперсных древесных материалов, и способы термообработки, реализуемые с помощью данного комплекса / Пекарец А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «ПРОМЕТЕЙ». [Pekarets A.A. *System for Continuous Heat Treatment of Solid Fine Particles, Mainly Disperse Wood Materials and Methods of Heat Treatment, Implemented Using Said Complex*. Patent RF, no. 2596683, 2016].

11. Патент № 2628602 Российская Федерация, МПК C10B 53/02. Устройство для получения древесного угля / А.А. Пекарец; патентообладатель ООО «ПРОМЕТЕЙ». [Pekarets A.A. *Wood Coal Production Device*. Patent RF, no. 2628602, 2017].

12. Патент № 2653513 Российская Федерация, МПК C10L 5/44, C10L 5/40. Высококалорийные топливные брикеты из композиционного материала на основе древесных отходов (варианты) / А.А. Пекарец; патентообладатель ООО «ПРОМЕТЕЙ». [Pekarets A.A. *High-Energy Fuel Briquets from Composite Material Based on Remains of Wooden Materials (Options)*. Patent RF, no. 2653513, 2018].

13. Патент № 2678089 Российская Федерация, МПК C10L 5/44, C10B 47/28, C10B 49/02, B09B 3/00. Промышленный комплекс для производства древесного угля

безотходным способом низкотемпературного пиролиза из брикетированных древесных отходов / А.А. Пекарец; патентообладатель ООО «ПРОМЕТЕЙ». [Pekarets A.A. *Industrial Complex for the Production of Charcoal without Waste Method of Low-Temperature Pyrolysis from Briquette Wood Waste*. Patent RF, no. 2678089, 2019].

14. Попова Е.И. Совершенствование технологии торрефикации вторичных древесных ресурсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2018. 24 с. [Popova E.I. *Improving the Technology of Torrefaction of Secondary Wood Resources*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2018. 24 p.].

15. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 249 с. [Sobolev Yu.S. *Wood as a Structural Material*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 249 p.].

16. Akim E.L. Biorefining of Wood. *Fibre Chemistry*, 2016, vol. 48, iss. 3, pp. 181–190. DOI: [10.1007/s10692-016-9765-7](https://doi.org/10.1007/s10692-016-9765-7)

17. Akim E.L., Mandre Y.G., Pekarets A.A. Change in Relaxation State of Polymer Components of Wood During its High-Temperature Biorefining. *Fibre Chemistry*, 2019, vol. 51, iss. 3, pp. 164–169. DOI: [10.1007/s10692-019-10067-8](https://doi.org/10.1007/s10692-019-10067-8)

18. *Forest Products Annual Market Review 2018–2019*. New York, United Nations, 2019. 137 p. Available at: <http://www.unece.org/forests/fpamr2019> (accessed 12.05.19).

19. Pekarets A.A., Mandre Y., Vinogradov N., Akim E.L. Biorefining of Larch Sawdust Producing Wood and Wood-Charcoal Briquettes: Scientific and Technological Aspects. *Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal, May 27–30, 2019*. Lisbon, 2019, pp. 1887–1889.

20. Popp J., Lakner Z., Harangi-Rákos M., Fári M. The Effect of Bioenergy Expansion: Food, Energy and Environment. *Renewable and Sustainable Energy*, 2014, vol. 32, pp. 559–578. DOI: [10.1016/j.rser.2014.01.056](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056)

21. *Renewable Energy – Medium-Term Market Report 2016*. OECD/IEA, 2016. 281 p.

22. Thiffault E., Asikainen A., Devlin G. Comparison of Forest Biomass Supply Chains from the Boreal and Temperate Biomes. Ch. 2. *Mobilisation of Forest Bioenergy in the Boreal and Temperate Biomes*. Ed. by E. Thiffault, C.T. Smith, M. Junginger, J. Saddler, G. Berndes. Academic Press, 2016, pp. 10–35. DOI: [10.1016/B978-0-12-804514-5.00002-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804514-5.00002-0)

23. Tumuluru S.J., Wright C.T., Kenny K.L., Hess J.R. *A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application*. Idaho Falls, ID, INL, 2010. 85 p.

24. Van Dam J. *The Charcoal Transition: Greening the Charcoal Value Chain to Mitigate Climate Change and Improve Local Livelihoods*. Rome, FAO, 2017. 178 p.

25. Wertz J.-L., Deleu M., Coppée S., Richel A. *Hemicelluloses and Lignin in Biorefineries*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2017. 330 p. DOI: [10.1201/b22136](https://doi.org/10.1201/b22136)

26. *Wood Energy in the ECE Region: Data, Trends and Outlook in Europe, the Commonwealth of Independent States and North America*. Ed. by F.X. Aguilar. New York, United Nations, 2018. 94 p. Available at: <http://www.unece.org/index.php?id=48593> (accessed 12.05.19).

ELASTIC AND RELAXATION PROPERTIES OF LARCH WOOD AND THEIR ROLE IN PRODUCTION OF WOOD AND CHARCOAL BRIQUETTES

A.A. Pekarets¹, Postgraduate Student

O.A. Erokhina², Head of Laboratory

V.V. Novozhilov², Master

Yu.G. Mandre², Doctor of Engineering

E.L. Akim², Doctor of Engineering, Prof.

¹LLC Forest Technology Company, ul. Zvezdochka, 1, pos. Kachug, Irkutsk Region, 666210, Russian Federation; e-mail: esrplus@yandex.ru

²Higher School of Technology and Energy of the Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: art-stones@bk.ru

Processing of sawdust, which accounts for 10...12 % of the volume of processed raw wood materials in products with high added value, is one of the areas of woodbiorefining. This became a premise for sawdust processing into secondgeneration biofuel, as well as carbonized briquettes based on it. The relaxation properties of larch wood are studied and their role in the technological process carried out in creation of new generation biofuel with a given set of operational properties is analyzed taking into account the specific features of relaxation transitions at the stages of obtaining wood and charcoal briquettes. The relationship between the directed change in the relaxation state of the wood polymer components (lignin, cellulose and hemicelluloses) and the operational parameters is considered. The experimental data findings confirm that cellulose and hemicelluloses are in a high-elastic state in the initial wood and sawdust. It is advisable to ensure that the wood polymer components are transferred below the brittle temperature, in other words, wood should be dried to the lowest possible residual moisture, in order to grind wood sawdust to a powdery state with minimum energy consumption. Subsequent steam humidification to a moisture content of 3...4 % gives the system extrusion ability due to the formation of hemicellulose gel layers on the surface.

For citation: Pekarets A.A., Erokhina O.A., Novozhilov V.V., Mandre Yu.G., Akim E.L. Elastic and Relaxation Properties of Larch Wood and Their Role in Production of Wood and Charcoal Briquettes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208

Keywords: wood biorefining, larch wood, biofuel, wood briquettes, charcoalbriquettes, pellets, physical and mechanical properties, relaxation properties.

Поступила 12.05.19 / Received on May 12, 2019
