

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

1

2025

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

1

2025

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

EDITORIAL BOARD:

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Р.В. Котельников, А.А. Мартынюк.</i> Модифицированная методика расчета региональных шкал пожарной опасности в лесах.....	9
<i>В.А. Ананьев, Н.В. Геникова, А.Н. Пеккоев, Р.П. Обабко.</i> Особенности строения и структуры коренного разновозрастного ельника в национальном парке «Водлозерский».....	25
<i>А.К. Габделхаков, В.Ф. Коновалов, З.З. Рахматуллин, М.В. Мартынова, И.И. Фазлутдинов.</i> Вариативность диаметров деревьев в древостоях липы мелколистной.....	42
<i>К.А. Башегуров, А.Н. Гавриленко, Е.П. Розинкина, А.С. Попов, С.В. Залесов, И.В. Предеина.</i> Естественное лесовосстановление на вырубках в северо-таежном равнинном районе Западной Сибири.....	58
<i>С.А. Корчагов, Е.А. Сурина, О.А. Конюшатов, Н.С. Минин, Л.Г. Гоголева.</i> Лесоводственная оценка комплексных рубок в лесах Вологодской области.....	71
<i>Н.В. Мальшева, Т.А. Золина, А.Н. Филипчук.</i> Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов.....	83
<i>И.К. Гайсин.</i> Послепожарные изменения в светлохвойных лесах Башкирского заповедника.....	98
<i>А.С. Манаенков, П.М. Подгаецкая.</i> Водный режим защитных лесных полос в сухой степи Алтайского края.....	115
<i>Б.Б. Климов, А.В. Грязькин, О.И. Гаврилова.</i> Состав фитоценозов на лесных гарях Бурятии.....	134

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

<i>К.П. Рукомойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, Е.М. Царев, В.П. Комисар.</i> Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки.....	145
<i>С.В. Посыпанов, С.П. Карпачев, В.И. Клевеко.</i> Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов.....	164
<i>А.Б. Дягилева, А.И. Смирнова, П.И. Ленивецев.</i> Лесопромышленный комплекс и процесс техногенеза.....	177

Р.Г. Сафин, К.В. Валеев, Л.Р. Фахрутдинова. Свойства коры березы, влияющие на сепарацию бересты от луба..... 197

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

И.А. Косарев, А.В. Гурьев. Конструкционная прочность изделий из гофрированного картона..... 210



CONTENTS

FORESTRY

<i>R.V. Kotelnikov, A.A. Martynyuk.</i> A Modified Methodology for Calculating Regional Forest Fire Hazard Scales.....	9
<i>V.A. Ananyev, N.V. Genikova, A.N. Pekkoev, R.P. Obabko.</i> Features of the Structure and Composition of the Indigenous Uneven-Aged Spruce Forest in the Vodlozersky National Park.....	25
<i>A.K. Gabdelkhakov, V.F. Konovalov, Z.Z. Rakhmatullin, M.V. Martynova, I.I. Fazlutdinov.</i> Variability of Tree Diameters in Small-Leaved Linden Stands.....	42
<i>K.A. Bashegurov, A.N. Gavrilenko, E.P. Rozinkina, A.S. Popov, S.V. Zalesov, I.V. Predeina.</i> Natural Reforestation in the Felling Sites in the North Taiga Lowland Area of Western Siberia.....	58
<i>S.A. Korchagov, E.A. Surina, O.A. Konyushatov, N.S. Minin, L.G. Gogoleva.</i> Silvicultural Assessment of Complex Logging in the Forests of the Vologda Region.....	71
<i>N.V. Malysheva, T.A. Zolina, A.N. Filipchuk.</i> Carbon Stocks in Soils Based on the State Forest Inventory Data.....	83
<i>I.K. Gaisin.</i> Post-Fire Changes in Light Coniferous Forests of the Bashkir Nature Reserve.....	98
<i>A.S. Manaenkov, P.M. Podgaetskaya.</i> The Water Regime of Forest Shelterbelts in the Dry Steppe of the Altai Territory.....	115
<i>B.B. Klimov, A.V. Gryazkin, O.I. Gavrilova.</i> The Composition of Phytocenoses in Forest Burnt Areas of Buryatia.....	134

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

<i>K.P. Rukomojnikov, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova, E.M. Tsarev, V.P. Komisar.</i> Simulation Modeling of Technological Processes of Logging.....	145
<i>S.V. Posypanov, S.P. Karpachev, V.I. Kleveko.</i> Calculated Forces during Cross-Cutting of Rafting Bundles in Coastal Warehouse Conditions.....	164
<i>A.B. Dyagileva, A.I. Smirnova, P.I. Lenivtsev.</i> Timber Industry and the Process of Technogenesis.....	177

R.G. Safin, K.V. Valeev, L.R. Fakhrutdinova. The Properties of Birch Bark Affecting the Separation of Birch Bark from Bast..... 197

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

I.A. Kosarev, A.V. Guriev. Structural Strength of Corrugated Cardboard Products... 210



Научная статья

УДК 630*614.849

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-9-24

Модифицированная методика расчета региональных шкал пожарной опасности в лесах

Р.В. Котельников[✉], канд. техн. наук; *ResearcherID*: [B-2453-2018](https://orcid.org/0000-0002-9984-5913),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5913>

А.А. Мартынюк, д-р с.-х. наук, проф., *акад. РАН*; *ResearcherID*: [AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; kotelnikovrv@firescience.ru[✉], vniilm_martinuk@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.23 / Одобрена после рецензирования 03.10.23 / Принята к печати 06.10.23

Аннотация. Условия погоды являются одним из наиболее важных факторов, влияющих на пожарную опасность лесов. В России именно показатели, характеризующие пожарную опасность в лесах в зависимости от условий погоды, традиционно используются для регламентации работы лесопожарных служб. В частности, класс пожарной опасности, методика расчета которого (основанная на разработках В.Г. Нестерова) утверждена приказом Рослесхоза, используется для расчета кратности авиационного патрулирования лесов. С учетом разной плотности метеостанций в разные годы были разработаны несколько модификаций этого метода, таких как ПВ-1, ПВ-2, ПВГ, но официально утвержденной, несмотря на ряд недостатков, является только методика Нестерова. Накопление больших объемов структурированных данных, а также развитие информационных технологий позволяют оптимизировать существующие подходы к расчету граничных значений комплексного показателя пожарной опасности в лесах и впервые выполнить детализированные расчеты для всех регионов Российской Федерации. Таким образом, в России возникли предпосылки для обновления нормативно-правовой базы в этой сфере. Предложенная модифицированная методика основывается на классическом принципе оценки границ классов в шкале пожарной опасности, соответствующих доле возникающих лесных пожаров: 5, 20, 45, 70 %. Вместе с тем принципиальным новым является выбор (на основании численного критерия) методики, наиболее подходящей для конкретной территории. При этом методику Нестерова и ПВГ предлагается использовать в модифицированном варианте (со значениями температуры и точки росы за вчерашние сутки при обновленных данных об осадках: день/ночь). В работе обосновано, что такие изменения существенно не повлияют на адекватность показателя, при этом позволят осуществлять расчет на утро текущего дня, что необходимо для практического применения. Важной особенностью стал также переход на средневзвешенный расчет индексов. За единицу расчета для небольших по лесной



площади регионов выбран субъект Российской Федерации в целом. Крупные регионы были поделены по границам лесных районов. Для субъектов Российской Федерации с ярко выраженным внутрисезонным колебанием горимости шкалы рассчитаны отдельно для характерных периодов. Для визуализации полученных в ходе исследования шкал разработан специальный интерактивный веб-сервис, что существенно упростило процесс контроля и интерпретации результатов. Предложенные шкалы могут быть использованы для совершенствования нормативно-правовой базы в области охраны лесов от пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, пожарная опасность, комплексный показатель, модифицированная методика, региональные шкалы

Для цитирования: Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Модифицированная методика расчета региональных шкал пожарной опасности в лесах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 9–24. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-9-24>

Original article

A Modified Methodology for Calculating Regional Forest Fire Hazard Scales

Roman V. Kotelnikov[✉], Candidate of Engineering; ResearcherID: [B-2453-2018](https://orcid.org/0000-0002-9984-5913),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5913>

Alexander A. Martynyuk, Doctor of Agriculture, Prof., Academician of the RAS;
ResearcherID: [AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow Region, 141202, Russian Federation; kotelnikovrv@firescience.ru[✉],
vniilm_martinuk@mail.ru

Received on July 15, 2023 / Approved after reviewing on October 3, 2023 / Accepted on October 6, 2023

Abstract. Weather conditions are one of the most important factors affecting forest fire hazard. In Russia, it is the indices characterizing the fire hazard in forests depending on weather conditions that are traditionally used to regulate the work of forest fire services. In particular, the fire hazard class, the calculation method for which (based on the developments by V.G. Nesterov) has been approved by the order of the Federal Forestry Agency, is used to calculate the frequency of aviation patrols of forests. Taking into account the different densities of weather stations in different years, several modifications of this method have been developed, such as PV-1, PV-2, PVG, but only the Nesterov method is officially approved, despite a number of disadvantages. The accumulation of large volumes of structured data, as well as the development of information technologies, makes it possible to optimize existing approaches to calculating the boundary values of a complex fire hazard index in forests and, for the first time, to perform detailed calculations for all regions of the Russian Federation. Thus, prerequisites have arisen in Russia for updating the regulatory legal framework in this area. The proposed modified methodology is based on the classical principle of assessing the boundaries of classes in the fire hazard scale, corresponding to the proportion of forest fires that occur: 5, 20, 45 and 70 %. At the same time, the fundamental new feature is the choice (based on a numerical criterion) of the methodology that is most suitable for a specific territory. In this case, it is proposed to use the Nesterov and PVG method in a modified version (with temperature and dew point values for yesterday with updated precipitation data: day/night). This paper substantiates that such changes will not significantly affect the adequacy



of the index, while allowing calculations to be made for the morning of the current day, which is necessary for practical application. Another important feature has been the transition to a weighted average calculation of indices. The subject of the Russian Federation as a whole has been selected as a unit of calculation for regions with small forest areas. Large regions have been divided along the boundaries of forest areas. For the subjects of the Russian Federation with pronounced intra-seasonal fluctuations in fire frequency index, the scales have been calculated separately for characteristic periods. To visualize the scales obtained during the study, a special interactive web service has been developed, which has significantly simplified the process of monitoring and interpreting the results. The proposed scales can be used to improve the regulatory framework in the field of forest fire protection.

Keywords: forest fires, fire hazard, complex index, modified methodology, regional scales

For citation: Kotelnikov R.V., Martynyuk A.A. A Modified Methodology for Calculating Regional Forest Fire Hazard Scales. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1, pp. 9–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-9-24>

Введение

С учетом глобальных климатических изменений проблема лесных пожаров становится все более актуальной. При этом отмечается не только увеличение площадей, пройденных огнем, но и гибель лесов [10, 14], прежде всего в ряде российских регионов (особенно в Сибири), которые попадают в область ускоренных климатических изменений [11, 16]. На этом фоне все чаще поднимается вопрос о необходимости совершенствования подходов к метеорологическому обеспечению противопожарных мероприятий.

Риски возникновения лесных пожаров зависят от многих факторов, ключевым из которых являются условия погоды [11]. Способ оптимизации затрат на мероприятия, связанные с охраной лесов от пожаров, – их увязка с показателями пожарной опасности. В качестве показателей в зависимости от выбранных методик может использоваться комплексный показатель (далее – индекс) или класс (определяемый на основе попадания индекса в установленные границы классов – шкалы). Текущая классификация пожарной опасности в лесах утверждена приказом Рослесхоза от 05.07.2011 № 287.

Так как одно из самых затратных мероприятий в этой сфере – авиационное патрулирование – напрямую зависит от класса пожарной опасности («Порядок организации и выполнения авиационных работ по охране лесов от пожаров», утвержденный приказом Минприроды России от 15.11.2016), даже незначительное изменение алгоритма расчета индексов в масштабе страны может привести к значительному изменению затрат на эти цели.

Разная плотность метеостанций в предыдущий период обусловила разработку нескольких подходов для оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды, таких как шкала на основе индекса засухи В.Г. Нестерова, показатели влажности покрова (ПВ-1) и подстилки (ПВ-2) [2, 5, 7, 19], расчет которых в настоящее время автоматизирован средствами «Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства» (ИСДМ-Рослесхоз) [13]. В литературе также упоминается показатель влажности с поправкой на гигроскопичность растительного горючего материала (ПВГ) [7], но на практике он пока не нашел применения. Все перечисленные индексы представляют собой разновидности накопительного индекса засухи

и принципиально отличаются в основном лишь методами учета осадков. Большое разнообразие зарубежных индексов и показателей [1, 9, 15, 17, 18] не может быть применено для условий Российской Федерации из-за ограниченного объема доступной информации.

Существенные зонально-географические и лесопирологические особенности территорий России требуют индивидуального подхода к оценке пожарной опасности лесов [8]. Однако несмотря на то, что разработке региональных шкал пожарной опасности по условиям погоды для лесов посвящено большое количество исследований, например, [1, 2, 5, 7] и др., в России преимущественно используется только методика Нестерова и в большинстве (82 %) регионов – общепринятые границы классов (приказ Рослесхоза от 05.07.2011 № 287).

В рамках ранее проведенных научных работ [4] были обоснованы подходы к сравнению шкал. Целью использования предлагаемых индексов является в первую очередь оценка рисков возникновения лесных пожаров, хотя естественно, что условия погоды также влияют на темпы распространения огня и сложность его тушения. В ходе исследования предпринимались попытки выявить взаимосвязь между индексами пожарной опасности и площадью, пройденной огнем. Но поскольку на площади пожаров влияет гораздо большее число факторов (включая техническую оснащенность подразделений, объемы финансирования, наличие инфраструктуры, качество управленческих решений), выявить такую взаимосвязь затруднительно. Следовательно, для оценки адекватности различных методик целесообразно применять в качестве критерия оценки корреляцию между индексом и частотой возникающих пожаров [6].

Накопление больших объемов структурированных данных в сфере охраны лесов от пожаров, а также развитие информационных технологий позволяют оптимизировать существующие подходы к определению граничных значений комплексного показателя пожарной опасности в лесах по условиям погоды и впервые выполнить детализированные расчеты для всех регионов Российской Федерации.

Для 15 субъектов страны Рослесхоз на основании предложений, поступивших от региональных органов исполнительной власти в области лесных отношений, приказом от 09.10.2023 № 288 утвердил индивидуальные границы данного показателя. Так как проверка предложений законодательно не была предусмотрена, ряд субъектов воспользовался ситуацией, чтобы перераспределить на другие (более важные с их точки зрения) цели часть средств, запланированных на охрану лесов, за счет занижения границ классов (и соответственно, количества летных часов на авиапатрулирование). Это является дополнительным аргументом в пользу унификации подхода к расчету региональных шкал оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды и обновления нормативной правовой базы в этой сфере.

Целью исследования являлась разработка методики расчета границ классов пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды для различных территорий (далее – региональные шкалы).

При проведении исследования принималось во внимание, что большинство ранее выполненных расчетов не учитывало форму статистического распределения – исходных данных и выполнялось обычно для небольших территорий. Значительный объем накопленных данных, а также развитие современных методов их обработки позволяют модифицировать известные подходы с целью повышения их адекватности. Основной гипотезой исследования является то,

что на различных территориях и для разных периодов пожароопасного сезона статистика возникновения лесных пожаров существенно отличается, что обуславливает необходимость разработки отдельных (региональных) шкал пожарной опасности по условиям погоды, позволяющих более достоверно оценивать риски возникновения и динамику лесопожарной ситуации.

Для достижения указанной цели предусматривалось решение следующих пошаговых задач:

определиться с минимальной территориальной единицей, для которой будет выполнен сравнительный расчет комплексных показателей пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды (далее – индексов пожарной опасности в лесах);

выбрать временной диапазон, по которому будут формироваться выборки для расчета индексов, и определить оптимальный интервал агрегирования данных по времени;

обосновать критерий выбора наиболее адекватных методик расчета индекса пожарной опасности и региональных шкал (границ классов);

установить критерий оценки целесообразности разработки отдельных шкал для разных периодов пожароопасного сезона;

предложить программу (набор программных скриптов) для обработки данных;

создать инструментарий визуализации полученных в ходе расчета региональных шкал, упрощающий процесс контроля и интерпретации результатов.

Предложенные в ходе работы подходы, в частности, по обоснованию формы распределения исходных данных [3], использованию средневзвешенного значения показателей [12], учету внутрисезонной динамики горимости, а также выбору методики расчета индекса, наиболее подходящей для данной территории, можно отнести к научной новизне исследования.

Объекты и методы исследования

В качестве исходных данных для достижения поставленной цели использовались сведения о лесных пожарах, полученные по результатам наземного и авиационного мониторинга, поступающие из региональных диспетчерских служб. Их анализ показал, что большой разброс места и времени возникновения лесных пожаров может быть вызван случайными факторами, не связанными с погодными особенностями, что приводит к необходимости агрегировать значения методом усреднения данных. Следовательно, выбор оптимального способа агрегирования исходных данных существенно влияет на точность прогнозирования. При этом излишнее усреднение не позволяет учесть специфику отдельных территорий и вынуждает дробить их на более мелкие образования.

Опыт практического применения классов пожарной опасности показывает, что целесообразно привязывать их к территориальному делению. При этом деление по лесничеству является логичным, но на практике неприменимым, т. к. для некоторых лесничеств количество пожаров мало (или иногда отсутствует), а для снижения влияния случайных факторов требуется большая выборка. Принимая во внимание, что административные границы территорий характеризуют уровень социально-экономического развития, а границы лесных райо-

нов – территории с относительно схожими условиями, оптимальным вариантом для малых регионов будет учет всей площади, а для крупных – ее деление по границам лесных районов. Крупными регионами считали субъекты Российской Федерации, площадь лесов в которых превышает 20 млн га. Значение выбрано условно, исходя из того, что если отсортировать площади земель лесного фонда в разрезе регионов, то примерно с этой величины начинается значительный рост.

Использование данных дистанционного мониторинга лесных пожаров из космоса затруднено визуальным дроблением крупных пожаров: из-за облачности и ограниченности количества спутников. При этом наземные данные, со своей стороны, имеют недостатки по достоверности, обусловленные человеческим фактором. Чем дальше в прошлое, тем ниже качество. В связи с этим для снижения влияния указанных факторов неопределенности на получаемые оценки был выбран диапазон в 11 лет с 2012 по 2022 гг., учитывающий в т. ч. среднюю продолжительность солнечного цикла, оказывающего воздействие на лесопожарную ситуацию [4].

В соответствии с данными [4], оптимальным уровнем агрегирования по времени можно считать декаду года (10 дней).

С учетом того, что форма распределения значений пожарной опасности ближе к логнормальной, чем к нормальной кривой [4], выбран оптимальный шаг группировки случаев 0,1 логарифма от анализируемого значения. В качестве примера приведен график взаимосвязи пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды и частоты возникновения лесных пожаров для Западно-Сибирского южно-таежного лесного района Красноярского края в весенне-летний период (рис. 1).

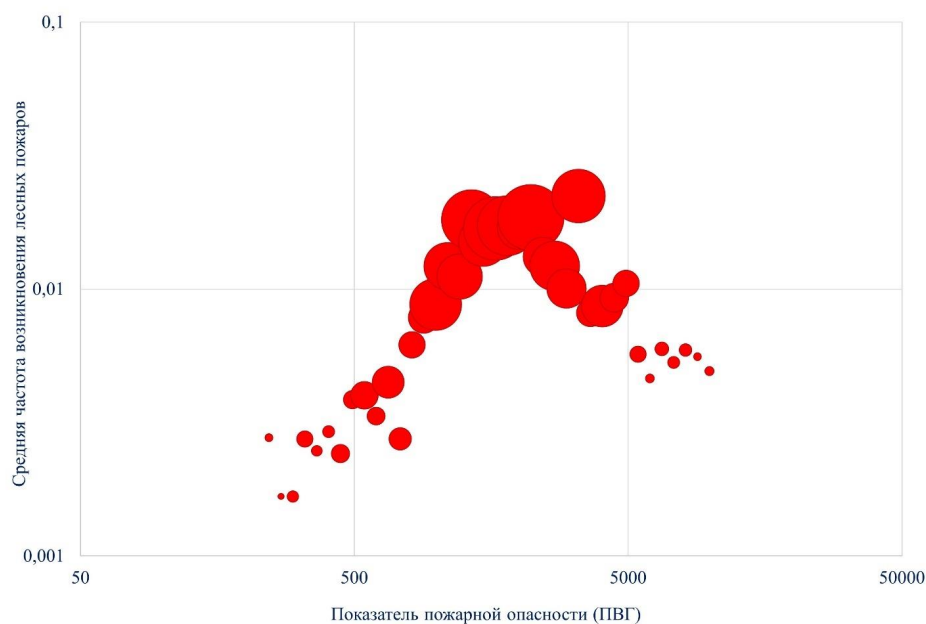


Рис. 1. Взаимосвязь между показателем пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды и частотой возникновения лесных пожаров (2012–2022 гг.)

Fig. 1. The relationship between the forest fire hazard index depending on weather conditions and the frequency of forest fires (2012–2022)

На рис. 1 все дни с пожарами за период с 2012 по 2022 гг. сгруппированы по интервалам, начало и конец которых рассчитываются по средней за 10 дней частоте возникновения лесных пожаров, а также по формуле

$$g_n = e^{0,1n},$$

где g_n – границы интервалов, по которым группируются значения индексов; n – номер интервала (ряд целых чисел начиная с 0).

Общий размер получившейся выборки составил 657 записей. Диаметр кругов на рисунке пропорционален количеству случаев (максимум – 635, минимум – 7). Как видно из рис. 1, выбранное агрегирование данных позволяет выделить явную закономерность и приемлемо для дальнейших исследований.

Из-за принципиально разных природно-климатических и лесопирологических особенностей территорий, а также из-за различной плотности расположения метеостанций (что влияет на правильность учета осадков) выбрать единую методику для всей территории страны затруднительно. Но, как было обосновано в предыдущих исследованиях [4], есть возможность установить для каждой территории наиболее подходящую шкалу. В качестве критерия оценки адекватности шкал целесообразно определить взаимосвязь между индексом и частотой возникновения лесных пожаров. Причем, учитывая, что форма статистического распределения значений (как индексов, так и частоты лесных пожаров) в большой выборке ближе к логнормальному значению [3], целесообразно преобразовывать значения (натуральным логарифмом), что позволит использовать показатель корреляции Пирсона [3, 4].

Несмотря на то, что для существующего подхода к оценке пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды, основанному на накопительных индексах засухи, альтернативы нет, необходимо было решить ряд организационно-технических проблем, связанных с методиками.

Так, в утвержденной методике В.Г. Нестерова для расчета комплексного показателя на текущий день предусмотрено использовать данные по температуре воздуха и точки росы из официальных метеонаблюдений по сроку, ближайшему к 14:00 текущего дня. Вместе с тем с организационной точки зрения принимать решение о вылете воздушного судна необходимо утром (обычно до 9:00 местного времени). Следовательно, применение прогнозных значений, полученных описанным способом, приводит к тому, что в некоторых случаях решение о необходимости патрулирования на основании прогноза может быть оспорено после перерасчета по фактическим значениям. Таким образом, возможны претензии со стороны проверяющих органов к обоснованности трат бюджетных средств.

Данная проблема решена в таких методиках как ПВ-1 и ПВ-2. Учитывая, что все индексы накопительные, использование температуры, измеренной в предыдущий день, не сильно влияет на значение индекса [4]. Для преодоления указанных недостатков, основываясь на аналогичном подходе к определению показателей ПВ-1 и ПВ-2, предлагается скорректировать алгоритм расчета комплексного показателя В.Г. Нестерова и показателя ПВГ, используя информацию о температуре воздуха и точки росы из официальных источников, содержащих данные метеонаблюдений, по сроку, ближайшему к 14:00 предыдущего дня. При этом осадки учитываются на утро (чаще всего на 9:00 местного времени) текущего дня.

На основе анализа большого объема данных по всей стране за последние 11 лет можно сделать вывод, что выбранный в качестве оценки указанный критерий ухудшается незначительно (существенно меньше естественных колебаний), что дает основания в дальнейшем использовать именно модифицированные варианты расчета индексов В.Г. Нестрова и ПВГ (рис. 2, табл. 1). Как видно из гистограмм рис. 2, отклонение корреляции разнонаправленное, среднего значения корреляции за анализируемый период – не более чем на 6 %.

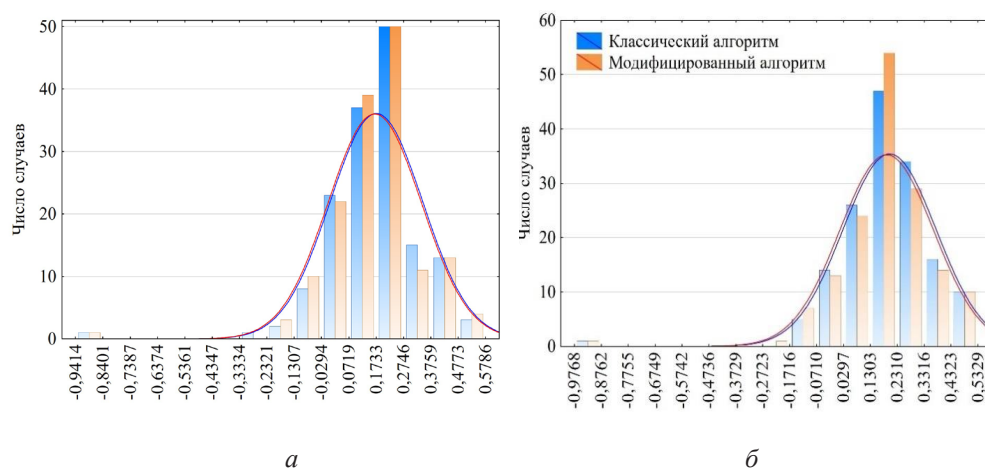


Рис. 2. Оценка влияния корректировки алгоритма расчета комплексных показателей оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды на распределение показателей Нестрова (а) и ПВГ (б) и частоты возникновения лесных пожаров

Fig. 2. The assessment of the effect of adjusting the algorithm for calculating complex indices of fire hazard assessment in forests according to weather conditions on the distribution of the Nesterov (a) and PVG (b) indices of indicators and the frequency of forest fires

Таблица 1

Сравнение адекватности модифицированных методик по корреляции между преобразованными индексами и частотой возникновения лесных пожаров
The comparison of the adequacy of the modified methods for the correlation between the transformed indices and the frequency of forest fires

Особенности алгоритма	Методика В.Г. Нестрова	Методика ПВГ
Классический подход с данными о температуре в текущий день	0,3187	0,3622
Предлагаемый подход с данными о температуре за предыдущий день	0,3017	0,3398

Наличие естественных колебаний значения корреляции характерно не только для указанных методик, но и для ПВ-1 и ПВ-2. Это связано с тем, что вероятность возникновения пожаров обуславливается не только погодными, но и иными факторами. Кроме того, ни одна методика не может учесть все возможные нюансы, связанные с воздействием погоды. Для снижения случайного влияния «прочих» факторов принято решение менять методику В.Г. Нестрова на другие только в тех случаях, когда она по значению корреляции превышает остальные более чем на 10 %. Таким образом, для каждой территории выбиралась лучшая

шкала из следующего списка: модифицированная шкала Нестерова, ПВ-1, ПВ-2 и модифицированная шкала ПВГ. Если данных для стабильной оценки недостаточно или отсутствуют шкалы, которые лучше других по значению корреляции более чем на 10 %, за основу принимается модифицированная шкала Нестерова.

В ряде регионов наблюдается различный характер горимости территорий в течение пожароопасного сезона, поэтому была проведена оценка наличия пиков горимости. Для этой цели в качестве границ лета экспертным путем выбран период с 17-й по 23-ю декаду (с 11 июня по 20 августа). В связи с существенностью случайных межгодовых колебаний наличием пика считался период, когда среднее еженедельное число лесных пожаров превышает значение в другие периоды не менее чем на 30 %. Как видно из диаграммы распределения среднедекадного количества возникающих лесных пожаров за анализируемый период в Красноярском крае (рис. 3), для представленного случая свойствен весенне-летний пик лесных пожаров.

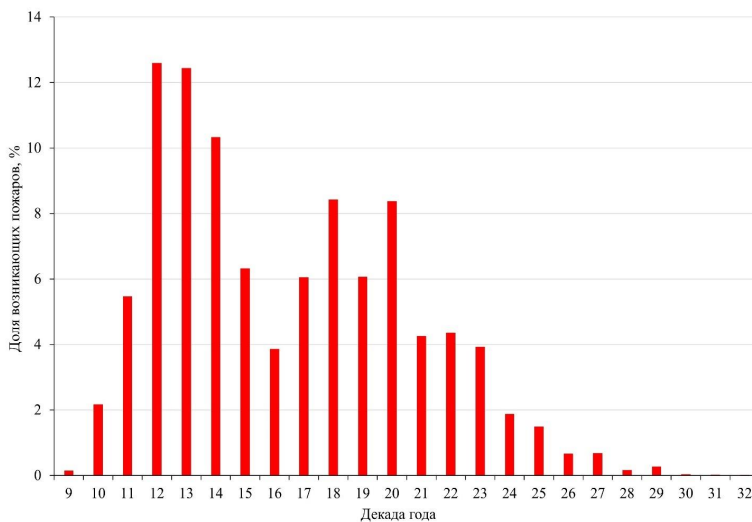


Рис. 3. Распределение пожаров в течение пожароопасного сезона (Красноярский край, 2012–2022 гг.)

Fig. 3. The distribution of fires during the fire season (The Krasnoyarsk Territory, 2012–2022)

При выборе методики расчета границ классов пожарной опасности в лесах (региональной шкалы пожарной опасности) необходимо руководствоваться следующими принципами.

Во-первых, регламентация работы лесопожарных служб в различных регионах должна основываться на единых подходах и быть эквивалентна уровню нагрузки на лесопожарные формирования. То есть 3-й класс пожарной опасности характеризует средний уровень опасности как в крупном регионе (например, Республика Саха (Якутия)), так и в малолесных регионах (Воронежская область). Шкала должна зависеть в первую очередь от погодных условий, а не от того, насколько хорошо организована охрана. В связи с этим в качестве основы деления по классам следует выбрать именно возникающие пожары, а не действующие. Конечно, погода влияет и на условия тушения, но его сложно отделить от других факторов.

Во-вторых, при корректировке шкал желательно сохранить определенную преемственность подходов. Учитывая изложенное, считаем целесообразным использовать классический принцип расчета границ классов в шкале пожарной опасности, соответствующих доле возникающих лесных пожаров: 5, 20, 45 и 70 %. Для этого необходимо выборку пар значений количества (или частоты возникновения) лесных пожаров с соответствующими значениями комплексных показателей пожарной опасности распределить по возрастанию значения комплексных показателей. Далее отделить 5 % всех пожаров и по шкале комплексного показателя получить значение, разделяющее 1-й и 2-й классы пожарной опасности; затем вычислить значение для 20 % возникающих пожаров, разделяющее 2-й и 3-й классы и т. д.

Для выполнения описанных расчетов, а также для визуализации полученных результатов авторами было разработано программное обеспечение, которое представляет собой набор программных модулей (скриптов), а также дашборд, сформированный в среде DataLens (рис. 4).

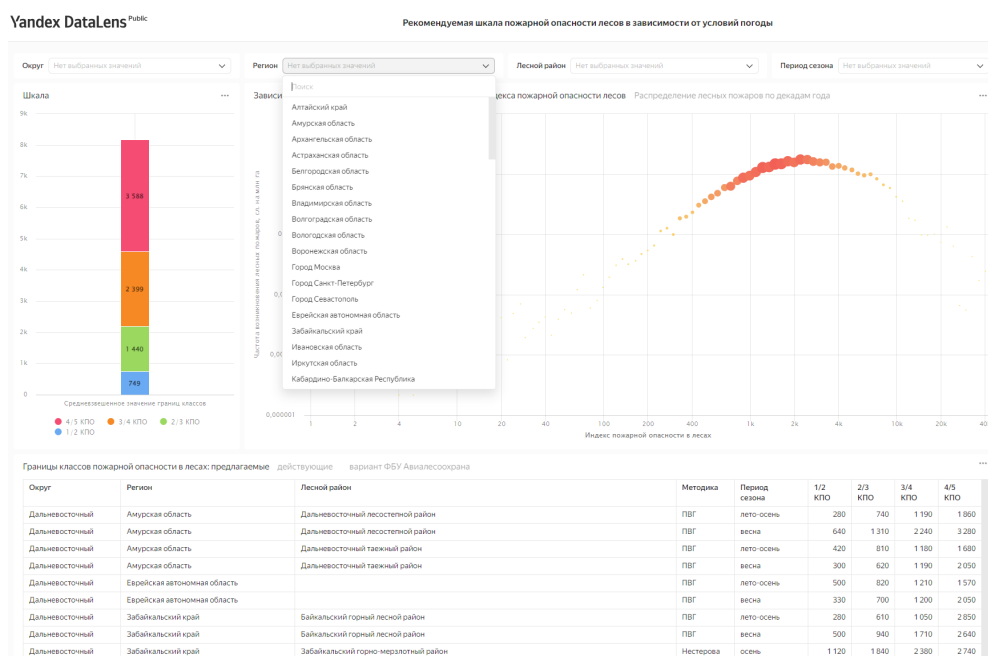


Рис. 4. Пример интерфейса программного обеспечения для визуализации результатов расчета границ классов пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды

Fig. 4. An example of a software interface for visualizing the results of calculating the boundaries of fire hazard classes in forests depending on weather conditions

Программный комплекс способен решать следующие задачи:

расчет внутрисезонного характера горимости территорий (региона в целом или для лесных районов внутри регионов, если площадь лесов более 20 млн га);

расчет границ классов пожарной опасности в зависимости от условий погоды;

выбор методики пожарной опасности в лесах, наиболее подходящей для данной территории;

- визуализация федерального округа, субъекта Российской Федерации, лесного района и периода пожароопасного сезона;
- визуализация зависимости частоты возникновения лесных пожаров от комплексного показателя пожарной опасности в лесах;
- визуализация распределения количества возникающих лесных пожаров по декадам;
- визуализация границ классов пожарной опасности в лесах (далее – границ классов) в виде диаграммы для выбранных территорий;
- визуализация рекомендуемых границ классов в табличном виде;
- визуализация действующих границ классов в табличном виде.

Результаты исследования и их обсуждение

Используя описанный выше подход к предварительной обработке исходных данных, были сформированы 4 выборки формата:

- индекс пожарной опасности, соответствующий центру интервала, определяемого по приведенной выше формуле;
- средняя за декаду частота возникающих лесных пожаров (далее – частота лесных пожаров).

Размер сформированной выборки, результаты расчета доли площади, на которой определенная методика показывает лучшие результаты, а также средневзвешенное значение корреляции между преобразованными индексами пожарной опасности и частотой возникновения лесных пожаров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнения методик расчета индексов пожарной опасности по значению корреляции между преобразованными индексами и частотой возникновения лесных пожаров
The results of a comparison of methods for calculating fire hazard indices based on the correlation value between the converted indices and the frequency of forest fires

Методика расчета	Количество пар значений в выборке	Доля площади Российской Федерации, %	Средневзвешенное (по площади) значение корреляции
ПВ-1	602 625	20,2	0,27
ПВ-2	612 822	21,6	0,21
ПВГ	595 078	16,7	0,27
Методика Нестерова	595 194	41,5	0,26

Полученные в ходе расчета результаты сведены в таблицу, фрагмент которой приведен ниже (табл. 3). Путем сравнения для каждой территории (субъекта Российской Федерации для малолесных районов или лесного района внутри субъекта Российской Федерации) корреляции Пирсона для преобразованных (натуральным алгоритмом) индексов пожарной опасности и частоты возникновения лесных пожаров, выбрано значение с превосходящей корреляцией при условии, что оно превышает остальные более чем на 10 %. В случае, если данных мало или нет явно выраженных различий (на такие территории приходится 40,6 % площади страны), для дальнейших расчетов за основу взята методика Нестерова.

Результат выбора наиболее оптимальной методики представлен в виде карты-схемы (рис. 5).

Таблица 3

Модифицированная классификация пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды по субъектам Российской Федерации в разрезе лесных районов (фрагмент)
 The modified classification of fire hazard in forests depending on weather conditions for the subjects of the Russian Federation in terms of forest areas (fragment)

Субъект Российской Федерации	Лесной район	Метод	Период сезона/сезон	Границы между классами			
				1-м и 2-м	2-м и 3-м	3-м и 4-м	4-м и 5-м
Архангельская область	Район притундровых лесов и редкостойной тайги Европейско-Уральской части	В.Г. Нестерова	Весь сезон	300	1000	4000	10000
			Весна–лето	1080	1870	2860	4330
			Осень	630	1230	1580	2150
Вологодская область	Северо-таежный район Европейской части	ПВ-1	Весна–лето	480	830	1250	1890
			Осень	470	900	1400	2380
			Весна–лето	300	730	1190	1830
Калининградская область	Двинско-Вычегодский таежный район	В.Г. Нестерова	Осень	80	330	640	920
			Весна	510	1260	2630	3920
			Лето–осень	300	1010	1410	2700
Ленинградская область	Весь регион	В.Г. Нестерова	Весна–лето	430	960	1680	2490
			Осень	150	490	1300	2050
			Весна	310	500	730	1210
Мурманская область		ПВ-1	Лето	210	400	840	1230
			Осень	200	310	470	620

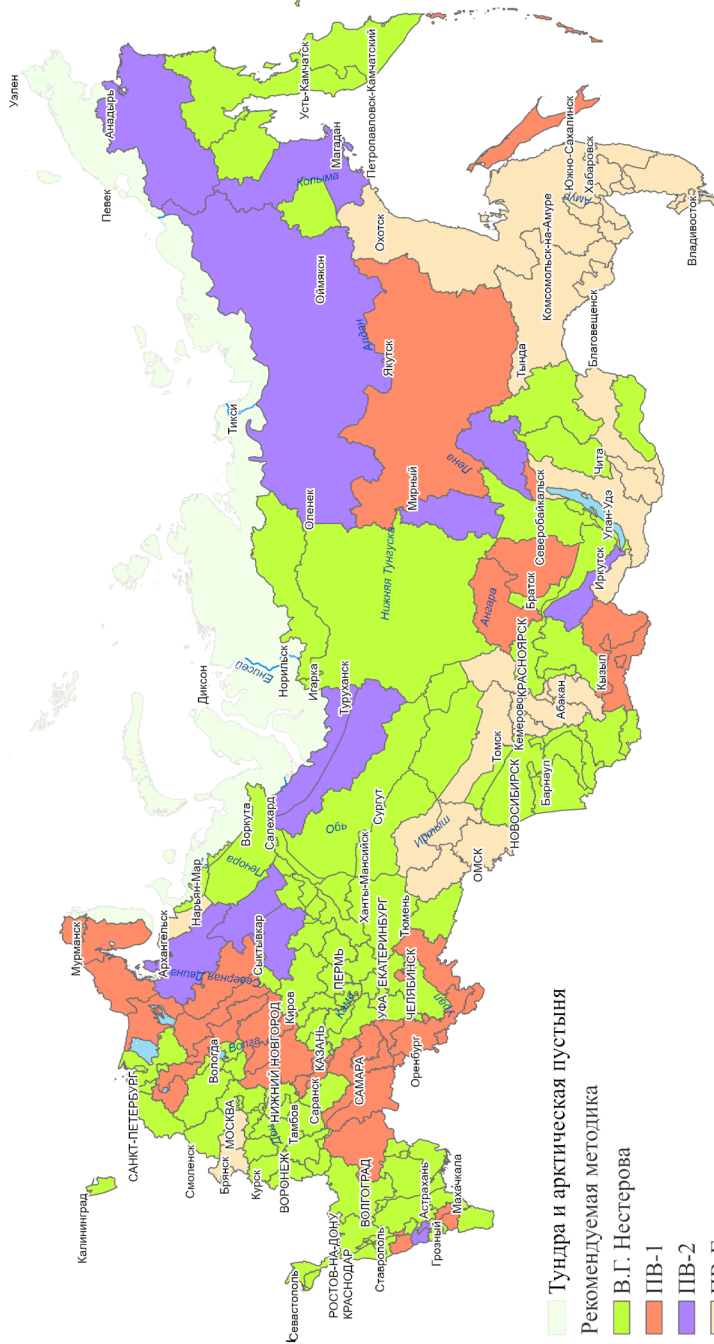


Рис. 5. Карта-схема рекомендуемых методов оценки пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды
 Fig. 5. The schematic map of recommended methods for assessing fire hazard in forests depending on weather conditions

Как видно из табл. 3, несмотря на одинаковые процентные значения границ классов, численные значения границ для разных лесных районов внутри регионов, а также для разных периодов пожароопасного сезона существенно отличаются, что подтверждает гипотезу о необходимости отдельного расчета для указанных территорий и периодов.

Заключение

Полученные в ходе предварительной обработки наборы данных показали средневзвешенную корреляцию Пирсона между преобразованными логарифмами индексов пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды и логарифмами частоты возникновения лесных пожаров большей, чем для непреобразованных значений. Кроме того, графики взаимосвязи индексов пожарной опасности и количества возникающих пожаров, сформированные в описанном в статье интерактивном веб-интерфейсе программного обеспечения, также подтверждают наличие устойчивой связи между названными показателями, что дает основание использовать эти данные для расчета границ шкал.

Сравнительный анализ классического подхода к расчету индексов пожарной опасности по методике В.Г. Нестерова, ПВГ и на основе нашего модифицированного подхода, использующего для утреннего расчета индексов температуру воздуха и точки росы по вчерашнему дневному измерению (в совокупности с актуальными данными об осадках: день/ночь), показал незначительные расхождения (не более 6 %). Таким образом, модифицированные показатели являются более подходящими для практического использования.

На разных территориях, для разных периодов пожароопасного сезона статистика возникновения лесных пожаров существенно отличается, что подтверждает целесообразность введения отдельных (региональных) шкал пожарной опасности по условиям погоды. Такой подход позволит более качественно оценивать уровень пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды.

Разработанные в ходе исследования шкалы могут быть использованы для совершенствования нормативно-правовой базы в области охраны лесов от пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра Рос. Федерации. 2012. № 347. С. 180–193.

Gubenko I.M., Rubinshtejn K.G. Comparative Analysis of Methods for Calculating Fire Hazard Indices. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossijskoj Federatsii* = Proceedings of Hydrometcentre of Russia, 2012, no. 347, pp. 180–193. (In Russ.).

2. Иванов В.А., Горошко А.А., Бакшеева Е.О., Головина А.Н., Морозов А.С. Региональные шкалы пожарной опасности по условиям погоды для лесов Амурской области // Хвойные бореал. зоны. 2020. Т. XXXVIII, № 1–2. С. 34–42.

Ivanov V.A., Goroshko A.A., Baksheeva E.O., Golovina A.N., Morozov A.S. Regional Fire Hazard Scales Based on Weather Conditions for Forests in the Amur Region. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2020, vol. XXXVIII, no. 1–2, pp. 34–42. (In Russ.).

3. Котельников Р.В., Лупян Е.А. Особенности дистанционно оцениваемых распределений площадей лесных пожаров для территорий с различным уровнем пожарной охраны // *Соврем. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 4. С. 75–87.

Kotelnikov R.V., Loupian E.A. Features of Remotely Estimated Distributions of Forest Fire Areas for Territories with Different Levels of Fire Protection. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 75–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87>

4. Котельников Р.В., Чугаев А.Н. Сравнительная оценка качества индексов пожарной опасности в лесах // *Сиб. лесн. журн.* 2023. № 6. С. 32–38.

Kotelnikov R.V., Chugaev A.N. Comparative Estimation of the Quality of Fire Danger Indexes in Forests. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2023, no. 6, pp. 32–38. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/SJFS20230604>

5. Плотникова А.С. Шкала природной пожарной опасности лесных экосистем И.С. Мелехова. Обзор современных российских методических подходов // *Вопр. лесн. науки*. 2021. Т. 4, № 2. Режим доступа: <https://jfsi.ru/4-2-2021-plotnikova/> (дата обращения: 18.11.24).

Plotnikova A.S. Scale of Natural Fire Danger of Forest Ecosystems of Melekhov I.S. Overview of Modern Russian Methodological Approaches. *Voprosy lesnoj nauki* = Forest Science Issues, 2021, vol. 4, no. 2, art. no. 83. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202142-2>

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023668649 РФ. Сравнение методик оценки пожарной опасности в лесах, в зависимости от условий погоды: № 2023667896; заявл. 30.08.2023; опубл. 30.08.2023 / Р.В. Котельников, А.Н. Чугаев.

Kotelnikov R.V., Chugaev A.N. Certificate of State Registration of a Computer Program 2023668649 RF. *Comparison of Fire Hazard Assessment Methods in Forests, Depending on Weather Conditions*, 2023. (In Russ.).

7. Софронова Т.М., Волокитина А.В., Софронов М.А. Совершенствование оценки пожарной опасности по условиям погоды в горных лесах Южного Прибайкалья: моногр. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева, Красноярский гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева, 2007. 236 с.

Sofronova T.M., Volokitina A.V., Sofronov M.A. *Improving the Assessment of Fire Hazard Based on Weather Conditions in the Mountain Forests of the Southern Baikal Region*: Monograph. Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafyev, 2007. 236 p. (In Russ.).

8. Buryak L.V., Kukavskaya E.A., Ivanov V.A., Malykh O.F., Kotelnikov R.V. Assessment of Fire Hazard and Its Dynamics in Forest Areas of Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2021, vol. 14, pp. 803–814. <https://doi.org/10.1134/S1995425521070040>

9. Ziel R.H., Bieniek P.A., Bhatt U.S., Strader H., Rupp T.S., York A. A Comparison of Fire Weather Indices with MODIS Fire Days for the Natural Regions of Alaska. *Forests*, 2020, vol. 11, no 5, art. no. 516. <https://doi.org/10.3390/f11050516>

10. Bartalev S.A., Stytsenko F.V. Assessment of Forest-Stand Destruction by Fires Based on Remote-Sensing Data on the Seasonal Distribution of Burned Areas. *Contemporary Problems of Ecology*, 2021, vol. 14, pp. 711–716. <https://doi.org/10.1134/S1995425521070027>

11. Hayasaka H. Fire Weather Conditions in Boreal and Polar Regions in 2002–2021. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 7, art. no. 1117. <https://doi.org/10.3390/atmos13071117>

12. Kotelnikov R.V., Chugaev A.N. Efficiency Evaluation of the Weighted Mean Calculation of the Forest Fire Hazard Class. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. vol. 875, art. no. 012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012064>
13. Kotel'nikov R.V., Lupyay E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V. Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz. *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, vol. 13, pp. 795–802. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070045>
14. Krylov A., McCarty J., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C. Remote Sensing Estimates of Stand-Replacement Fires in Russia, 2002–2011. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, art. no. 105007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105007>
15. Pezzatti G.B., De Angelis A., Bekar I., Ricotta C., Bajocco S., Conedera M. Complementing Daily Fire-Danger Assessment Using a Novel Metric Based on Burnt Area Ranking. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, vol. 295, art. no. 108172. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108172>
16. Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M. Arctic Amplification of Climate Change: a Review of Underlying Mechanisms. *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16, art. no. 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
17. Srock A.F., Charney J.J., Potter B.E., Goodrick S.L. The Hot-Dry-Windy Index: A New Fireweather Index. *Atmosphere*, 2018, vol. 9, no. 7, art. no. 279. <https://doi.org/10.3390/atmos9070279>
18. Šturm T., Fernandes P.M., Šumrada R. The Canadian Fire Weather Index System and Wildfire Activity in the Karst Forest Management Area, Slovenia. *European Journal of Forest Research*, 2012, vol. 131, pp. 829–834. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0556-7>
19. Torres-Rojo J.M. Index for the Estimation of the Occurrence of Forest Fires in Large Areas = Índice para la Estimación de Ocurrencia de Incendios Forestales en Superficies Extensas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2020, vol. XXVI, iss. 3, pp. 433–449. (In Span. and Eng.) <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.082>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*228.6

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-25-41

Особенности строения и структуры коренного разновозрастного ельника в национальном парке «Водлозерский»

В.А. Ананьев, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-8034-2020](https://orcid.org/0009-0002-8245-5836),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8245-5836>

Н.В. Геникова, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [M-2052-2013](https://orcid.org/0000-0001-6475-8396),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6475-8396>

А.Н. Пеккоев[✉], канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [U-7771-2018](https://orcid.org/0000-0002-7881-1140),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7881-1140>

Р.П. Обабко, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAL-7947-2020](https://orcid.org/0000-0003-0823-1623),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0823-1623>

Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; ananьев@krc.karelia.ru, genikova@krc.karelia.ru, pek-aleksei@list.ru[✉], gomaparrot@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.23 / Одобрена после рецензирования 02.09.23 / Принята к печати 04.09.23

Аннотация. Исследована структура коренного елового древостоя в национальном парке «Водлозерский». Показано, что при долговременном естественном развитии ельников в черничном типе лесорастительных условий формируются абсолютно разновозрастные среднеполнотные устойчивые древостои. Распределение деревьев по классам возраста в изученном сообществе характеризуется наибольшей представленностью ели 60–80 и 220–240 лет. Анализ ядер древесины выявил, что 18 % деревьев (30 % по запасу) поражено дереворазрушающими грибами. При этом число пораженных деревьев увеличивается с возрастом. Естественное возобновление ели на 92 % (8,92 тыс. шт./га) представлено жизнеспособными экземплярами и характеризуется относительно равномерным пространственным размещением. Густота и состояние подроста в сообществе способствуют поддержанию разновозрастной структуры древостоя. Высота ели, начала живой кроны, диаметр и площадь проекции, протяженность кроны увеличиваются с возрастом дерева, за исключением относительной протяженности кроны, средние значения данного показателя остаются практически одинаковыми для деревьев всех возрастных групп. По результатам анализа пространственных отношений в древостое выявлено, что все деревья в целом и ель разных возрастных групп, кроме деревьев до 80 лет, распределены случайно. Для деревьев до 80 лет характерно групповое размещение. Оценка индексов конкуренции для каждой ели со стороны деревьев в радиусе 10 м показала, что при увеличении силы воздействия со стороны ближайших деревьев высота и диаметр ствола, а также площадь проекции кроны «центрального» дерева уменьшаются. Воздействие соседних деревьев прослеживается на расстоянии до 8 м для елей старше 200 лет и до 12 м для елей до 80 лет.

Ключевые слова: коренные леса, устойчивость лесных сообществ, абсолютно разновозрастные ельники, вертикальная структура древостоя, горизонтальная структура древостоя, пространственное размещение деревьев

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Институт леса КарНЦ РАН при финансовой поддержке национального парка «Водлозерский». Благодарим канд. биол. наук. С.И. Грабовик (Институт биологии КарНЦ РАН) за помощь в закладке опытного объекта и описание видов напочвенного покрова.

Для цитирования: Ананьев В.А., Геникова Н.В., Пеккоев А.Н., Обабко Р.П. Особенности строения и структуры коренного разновозрастного ельника в национальном парке «Водлозерский» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 25–41. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-25-41>

Original article

Features of the Structure and Composition of the Indigenous Uneven-Aged Spruce Forest in the Vodlozersky National Park

Vladimir A. Ananyev, Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist;
ResearcherID: [AAD-8034-2020](https://orcid.org/0009-0002-8245-5836), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8245-5836>
Nadezhda V. Genikova, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [M-2052-2013](https://orcid.org/0000-0001-6475-8396), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6475-8396>
Aleksey N. Pekkoiev[✉], Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [U-7771-2018](https://orcid.org/0000-0002-7881-1140), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7881-1140>
Roman P. Obabko, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAL-7947-2020](https://orcid.org/0000-0003-0823-1623),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0823-1623>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; ananyev@krc.karelia.ru, genikova@krc.karelia.ru, pek-aleksei@list.ru[✉], romaparrrot@mail.ru

Received on June 5, 2023 / Approved after reviewing on September 2, 2023 / Accepted on September 4, 2023

Abstract. The structure of the indigenous spruce stand in the Vodlozersky National Park has been studied. It has been shown that with the long-term natural development of spruce forests in the blueberry type forest growth conditions, absolutely uneven-aged, medium-density, stable stands are formed. The distribution of trees by age classes in the studied community is characterized by the greatest representation of spruce trees 60–80 and 220–240 years old. The analysis of the wood samples has revealed that 18 % of the trees (30 % of the stock) have been affected by wood-destroying fungi. At the same time, the number of affected trees increases with age. Natural regeneration of spruce is 92 % (8.92 thousand pcs/ha) represented by viable specimens and is characterized by a relatively uniform spatial distribution. The density and condition of the undergrowth in the community contribute to maintaining the multi-age structure of the stand. The spruce tree height, its crown base height, the crown diameter and projection area, as well as its length increase with the age of the tree, with the exception of the relative length of the crown, the average values of this indicator remain almost the same for trees of all age groups. Based on the results of the analysis of spatial relationships in the stand, it has been revealed that all trees in general and spruce of different age groups, except for trees up to 80 years old, are distributed randomly. For trees up to 80 years old group placement is typical. An assessment of the competition indices for each spruce from trees within a 10 m radius has shown that with an increase in the impact force from nearby trees, the height and diameter of the stem, as well as the projection area of the crown of the “central” tree, decrease. The impact of neighbouring trees can be traced at a distance of up to 8 m for spruce trees older than 200 years and up to 12 m for spruce trees up to 80 years old.



Keywords: indigenous forests, sustainability of forest communities, absolutely uneven-aged spruce forests, vertical structure of the stand, horizontal structure of the stand, spatial placement of trees

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment to the Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences with the financial support of the Vodlozersky National Park. We thank S.I. Grabovik, candidate of biology (Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences) for assistance in laying out the experimental object and describing the types of ground cover.

For citation: Ananyev V.A., Genikova N.V., Pekkoev A.N., Obabko R.P. Features of the Structure and Composition of the Indigenous Uneven-Aged Spruce Forest in the Vodlozersky National Park. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 25–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-25-41>

Введение

В связи с повсеместным сокращением площадей коренных ненарушенных лесов [19, 22] возрастает актуальность исследования эволюционно закрепленных закономерностей организации и функционирования таких древостоев. Эти исследования позволяют выявлять фундаментальные основы формирования лесных экосистем, оценивать устойчивость и прогнозировать их дальнейшее развитие с учетом возможных глобальных изменений природного и антропогенного характера [5, 14, 28]. Известно, что разработка критериев устойчивости сообществ возможна лишь на репрезентативных территориях, где обеспечиваются саморегуляция и самовозобновление лесных экосистем [25]. В зоне бореальных лесов в максимальной степени таким критериям отвечают абсолютно разновозрастные ельники, близкие по фазам динамики к климаксовым лесным сообществам [13, 16]. В некоторой степени их можно назвать эталонами для интерпретации характера трансформации внутривидового состава и структуры (возрастной, пространственной, генетической) лесов, затронутых антропогенным воздействием.

В ряде европейских стран вопросы изучения различных компонентов старовозрастных растительных сообществ освещаются в работах, которые охватывают как зону смешанных и широколиственных лесов [18, 24], так и леса бореальной зоны [20, 21, 23]. Однако следует отметить, что в странах Европы массивы малонарушенных лесов сохранились фрагментарно, а разновозрастные ельники практически отсутствуют.

На территории европейской части России собран значительный объем данных о структуре коренных разновозрастных еловых древостоев, которые сохранились на особо охраняемых природных территориях, а также частично в эксплуатационных лесах [1, 5, 6, 14]. Авторы большинства работ связывают механизмы устойчивости лесных сообществ с определенным равновесным балансом прироста и отпада фитомассы, причем для каждого конкретного древостоя этот баланс является уникальным. В связи с чем актуальны исследования закономерностей формирования и взаимодействия основных компонентов коренных сообществ в различных типах лесорастительных условий, а также изучение структуры таких сообществ в фазах, близких к климаксовым.

Цель данной работы – рассмотреть строение и особенности формирования древесного полога среднетаежных разновозрастных ельников.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования располагались на землях национального парка «Водлозерский» – одного из крупных хорошо сохранившихся малонарушенных массивов типичных коренных лесов в Европе [1]. Парк территориально относится к юго-восточной окраине Фенноскандии и пролегает между $62^{\circ}08'–63^{\circ}36'$ с. ш. и $36^{\circ}15'–37^{\circ}35'$ в. д. Общая площадь парка составляет 472 тыс. га, из которых 73 % располагаются в Архангельской области, а 27 % – в Республике Карелии. Лесные земли занимают 50,2 % общей площади, при этом практически все они покрыты лесами естественного происхождения, которые в большинстве избежали промышленного освоения, за исключением некоторой части древостоев, находящихся в непосредственной близости от рек и озер. Лесные сообщества на территории национального парка образованы преимущественно елью, сосной, березой и осиной. Преобладают хвойные насаждения, которые в совокупности занимают 94,2 % площадей (ельники – 49,1 %, сосняки – 45,1 %). Представленность насаждений с преобладанием березы и осины невелика – 5,5 и 0,3 % соответственно. Для лесов парка характерно абсолютное преобладание черничного типа леса: для ельников – 67,2 %; для сосняков – 25,5 %. Около 86 % лесопокрытых площадей занимают спелые и перестойные насаждения. Исследование возрастной структуры лесов Водлозерского участкового лесничества [1] показало, что среди ельников наиболее распространены разновозрастные древостои: абсолютно разновозрастные (20,7 %), относительно разновозрастные (43,7 %) и условно разновозрастные (35,5 %).

Исследование строения и структуры коренного елового леса проводилось на постоянной пробной площади (ППП), размером 0,5 га, заложенной в 1999 г. сотрудниками Института леса Карельского научного центра РАН в юго-восточной части парка (Водлозерское участковое лесничество) в абсолютно разновозрастном чернично-сфагновом ельнике. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует *Vaccinium myrtillus* L. (35 %), несколько реже встречались таежные лесные виды: *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman (15 %), *Vaccinium vitis-idaea* L. (7 %) и *Linnaea borealis* L. (7 %). Проективное покрытие мхов составляло 80 %, из которых доминантом выступал сфагновый мох *Sphagnum girgensohnii* Russow (35 %). Также этот ярус представляли мхи *Dicranum fuscescens* Turner (10 %), *D. polysetum* Sw. (10 %) и *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al. (10 %).

В 1999 г. на ППП проведена таксация древостоя. Выполнен сплошной пересчет растущей части древостоя по породам, возрастным поколениям и ступеням толщины. При обработке полученных данных определялись основные таксационные показатели древостоя: состав, густота, сумма площадей сечений, средние диаметр и высота, полнота и запас. Для анализа возрастной структуры лесного сообщества в пределах ППП был установлен возраст каждой ели путем отбора кернов у шейки корня ствола (367 кернов). Деревья группировались по возрастным поколениям (по 40 лет). Древесный отпад распределялся по следующим категориям: ветровал, бурелом и сухостой – с вычислением запаса.

Учет подроста проводился на трансекте 65×2 м (130 м^2), заложенной по центру ППП. Подрост делился на категории по состоянию (жизнеспособный, нежизнеспособный) и высоте: мелкий (до 0,5 м), средний (0,51–1,5 м), крупный (более 1,5 м). Обработка результатов производилась на основании общепринятых принципов таксации.

Вертикальную структуру древостоя определяли, используя данные высот деревьев и крон, измеренных высотомером с точностью 0,25 м у всех деревьев на ППП.

Для описания горизонтальной структуры выполнено картирование древостоя в предварительно размеченной сетке по квадратам 5×5 м с фиксацией позиции каждого учетного дерева на ППП в прямоугольной системе координат (X , Y). Также при картировании у всех деревьев с точностью 0,1 м измерялся радиус кроны по 4 сторонам света. Для анализа пространственного размещения деревьев применяли парную корреляционную функцию $g(r)$, реализованную в пакете Spatstat [17] в программной среде R . Анализ точечных процессов основывался на проверке нулевой гипотезы о пространственной случайности. Проверку этой гипотезы проводили при помощи генераций конвертов Монте-Карло и отображали на графике в виде серой области (в нашем случае число генераций было равно 999, что соответствовало уровню значимости $p < 0,001$). Выход кривой функции $g(r)$ из области доверительного интервала на расстоянии r за пределы его верхней границы ($g(r) > 1$) свидетельствовал о пространственной кластеризации или группировке точечных процессов; выход за пределы нижнего доверительного интервала ($g(r) < 1$) – о регулярности точечных процессов на расстоянии r . Для полностью случайного точечного процесса (однородного процесса Пуассона) парная корреляционная функция $g(r)$ была равна 1.

В целях выявления конкурентных отношений между деревьями по каждой ели был вычислен индекс конкуренции как сумма углов до соседних деревьев [26], который показывает воздействие на нее этих деревьев. Полученные индексы ранжировались и разбивались на 3 группы, отражающие степень влияния окружающих деревьев (слабая, средняя и сильная). Затем проводили дисперсионный анализ конкурентного воздействия деревьев на варьирование высот и площадей проекций крон ели одной возрастной стадии (до 80 лет и старше 200 лет) в радиусе 10 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Состав и структура древостоя, отпада и естественного возобновления. Исследуемый древостой имел состав $4E_{220}2E_{260}2E_{180}1C_{200}1O_{100}+E_{80}+B_{80}$ и по типу возрастной структуры представлял абсолютно разновозрастный ельник, где, согласно определению С.А. Дыренкова [5], представлены все 40-летние возрастные группы (поколения) деревьев главной породы до предельного возраста, но ни одна из них не превышает 40 % общего запаса данной породы. Такие древостои в таежной зоне, как правило, сформированы климаксовыми сообществами коренных типов леса [5, 14, 15], которые обладают высокой экологической устойчивостью. Причем названные выше исследователи связывают

устойчивость коренных ельников не только с высоким уровнем биологического разнообразия, но и со структурной сложностью климаксовых фитоценозов за счет большей дифференцированности особей в популяции по возрасту, размеру и ценогическому положению. Общий запас древостоя составил 277 м³/га, в т. ч. 228 м³/га ели. Запас сухостоя был равен 20 м³/га, в т. ч. елового – 14 м³/га. Еловый ярус имел следующие таксационные показатели: число стволов – 686 шт./га, средний диаметр основного элемента леса – 27,6 см, средняя высота – 21,2 м. Относительная полнота древостоя – 0,86 (в т. ч. по ели – 0,73). Наибольшей представленностью характеризовались деревья низших ступеней толщины (8 и 12 см) – 45 % от общего количества, при этом запас древесины данной группы был чуть более 5 % от общего (рис. 1). Основная доля запаса растущей древесины (около 70 %) приходилась на крупномерные деревья (ступени толщины 28 см и более).

Распределение деревьев по классам возраста отличалось непрерывностью возрастного ряда и характерной для данного типа возрастной структуры 2-вершинностью [9] с максимумами в 60–80 и 220–240 лет (рис. 2). Возрастная структура представлена 15 классами возраста (от 1 до 320 лет). Однако около 1/2 числа стволов имели диаметр до 14 см, при возрасте от 1 до 220 лет. Еще Ю.И. Манько [7] отмечал, что в разновозрастных еловых сообществах в пределах одной ступени толщины могут встречаться деревья разного возраста, по причине способности ели долгое время находиться под пологом взрослого древостоя, сохраняя жизнеспособность. Закономерно и то, что большая часть запаса древесины приходилась на ступени толщины 28–44 см, об этом сказано также во многих публикациях, где рассмотрена структура разновозрастных ельников [5, 16].

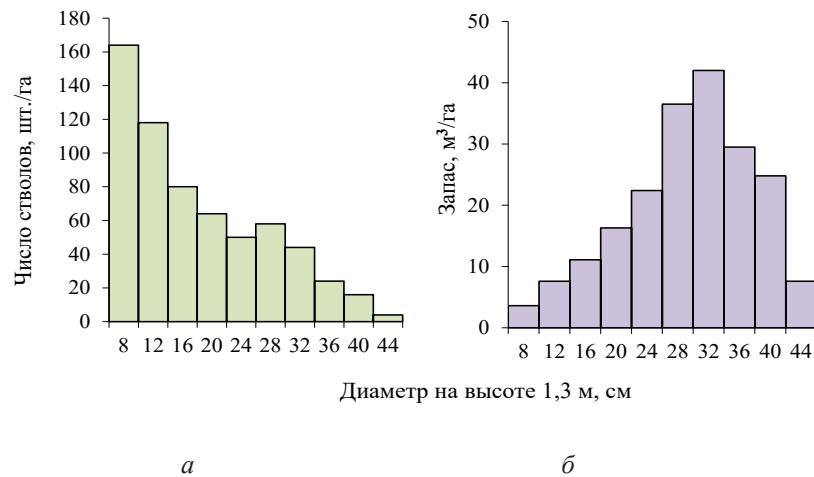
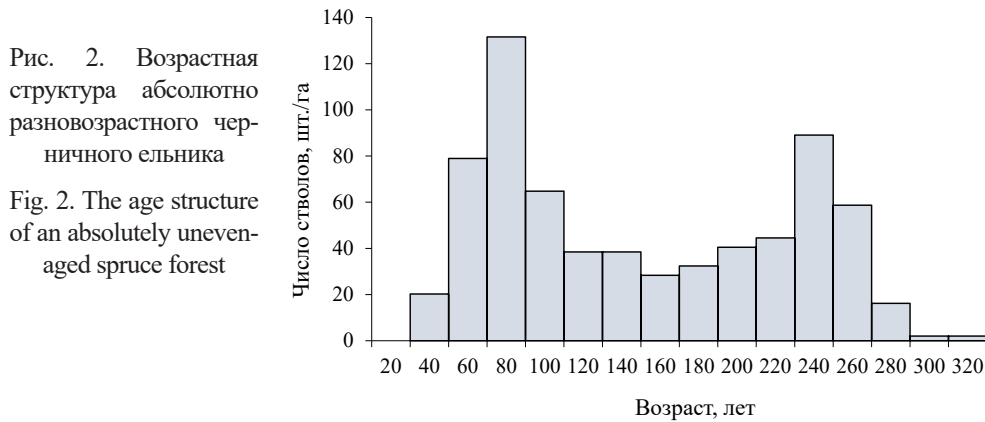


Рис. 1. Распределение деревьев по диаметру в зависимости от числа стволов (а) и запаса древесины (б) в абсолютно разновозрастном черничном ельнике

Fig. 1. The distribution of trees by diameter depending on the number of stems (a) and stand of timber (b) in an absolutely uneven-aged blueberry spruce forest



Обнаруживается заметная по силе (по шкале Чеддока) связь диаметра ели с ее возрастом (рис. 3). По данным К.С. Бобковой с соавт. [3], в коренных ельниках Печеро-Ильичского заповедника наблюдалась несколько менее тесная связь данных показателей ($R^2 = 0,23$).

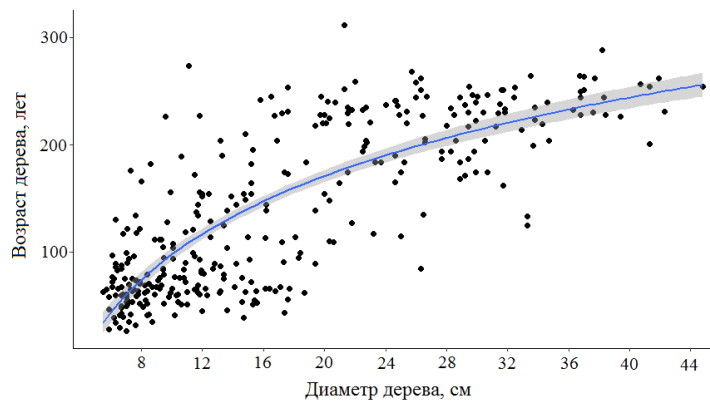


Рис. 3. Взаимосвязь диаметра с возрастом у ели в абсолютно разновозрастном черничном ельнике. Уравнение связи:
 $y = 104 \ln(x) - 141,2$, при $R^2 = 0,63$

Fig. 3. The relationship between diameter and age in spruce in an absolutely uneven-aged spruce forest. The relationship equation:
 $y = 104 \ln(x) - 141.2$ at $R^2 = 0.63$

Важным фактором, характеризующим устойчивость лесов, является их фаутиность. При анализе кернов растущих деревьев установлено, что пораженность стволов комлевой (напенной) гнилью, деструктурирующими грибами составила 18 % по числу стволов. При этом по мере увеличения возраста ели прослеживается тенденция повышения количества пораженных стволов. Если доля деревьев с гнилями в комлевой части ствола в возрастных поколениях до 120 лет

не превышала 4–6 %, то в поколениях от 121 до 240 лет она варьировала от 17 до 42 %, а в поколениях 241–320 лет – от 30 до 50 %. Аналогичная закономерная тенденция отмечалась в разновозрастных ельниках Европейской части России [14]. В перспективе деревья, пораженные грибами биотрофного комплекса, будут постепенно пополнять категорию отпада, что характерно для естественной динамики развития старовозрастных лесов.

Важную роль в пополнении поколений ели и продуцировании запаса в дальнейшем играет подрост. Под пологом исследуемого древостоя подрост ели представлен в основном жизнеспособными экземплярами (8,92 тыс. шт./га, или 92 % от общего числа подростка). Жизнеспособный подрост по высоте распределялся следующим образом: мелкий (до 0,5 м) – 64 %; средний (0,51–1,5 м) – 15 %; крупный (более 1,5 м) – 21 %. По данным А.Д. Волкова [4], для разновозрастных еловых лесов Карелии количество подростка составляет в среднем 4,5 тыс. шт./га. Считается, что при относительной полноте (0,7–1,0) естественная регенерация ельников протекает удовлетворительно, но несколько сдерживается высокой полнотой [9]. В нашем случае при полноте 0,86 число жизнеспособного подростка ели было высоким (8,92 тыс. шт./га). Можно предположить, что при оконном или массовом распаде древостоя лесовозобновление на обследованном участке будет протекать вполне успешно, тем более что, как правило, при распаде попутно происходит «взрыв» возобновления [10]. Наши данные еще раз подтверждают мнение В.Г. Стороженко [14], что количество подростка ели в коренных ельниках при их естественном развитии всегда достаточное для поддержания разновозрастной структуры сообщества.

Вертикальная структура древостоя. Наличие сложной вертикальной и горизонтальной структур древостоев является одним из важнейших условий формирования устойчивых лесных сообществ [28]. Вертикальная структура обследованного ельника имеет выраженную сомкнутость благодаря представленности деревьев различных высот. Практически для всех анализируемых показателей высотных характеристик древостоев (табл. 1) прослеживается увеличение амплитуды колебаний (коэффициентов вариации) в поколениях 121–160 и 161–200 лет.

Средняя высота начала живой кроны составляет 4,2 м и увеличивается с возрастом деревьев, а средняя протяженность кроны – 9,2 м. Относительная протяженность кроны практически одинакова во всех возрастных группах (в среднем 67 % от высоты дерева). Такой же результат получен и в ходе других работ по изучению разновозрастных ельников [9].

Кривая распределения деревьев ели по ступеням высоты (по 2 м) в обследованном сообществе характеризуется наличием 2 вершин (6 и 24 м) (рис. 4). Это, как и в распределении по диаметру, объясняется наибольшей представленностью в сообществе деревьев 2 градаций возраста с соответствующей высотой (до 80 лет и старше 220 лет).

На основе данных измерения высот всех елей на ППП были построены вертикально-возрастные профили, отражающие количество деревьев, формирующих древесный полог в каждом слое вертикального профиля [8].

Таблица 1

Показатели вертикальной структуры древесного полога в абсолютно разновозрастном черничном ельнике по возрастным поколениям
The parameters of the vertical structure of the tree canopy in an absolutely uneven-aged blueberry spruce forest by age generations

Показатель	Возрастное поколение ели					Все деревья
	до 80 лет	81–120 лет	121–160 лет	161–200 лет	от 200 лет	
<i>Высота деревьев, м</i>						
Среднее, м	8,0	10,1	12,3	16,5	21,0	13,4
Ошибка среднего	0,3	0,7	1,1	1,0	0,5	0,4
Коэффициент вариации, %	41,0	46,1	47,4	44,5	41,5	53,4
<i>Высота начала живой кроны, м</i>						
Среднее, м	2,5	3,1	3,9	5,8	6,5	4,2
Ошибка среднего	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,1
Коэффициент вариации, %	37,9	37,1	40,8	41,0	35,1	57,5
<i>Протяженность кроны, м</i>						
Среднее, м	5,5	7,0	8,5	10,7	14,5	9,2
Ошибка среднего	0,2	0,5	0,9	0,9	0,5	0,3
Коэффициент вариации, %	49,9	55,2	58,7	45,7	32,1	59,8
<i>Относительная протяженность кроны, %</i>						
Среднее, м	0,67	0,67	0,65	0,63	0,68	0,68
Ошибка среднего	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02
Коэффициент вариации, %	14,2	15,6	21,4	23,7	15,9	14,4

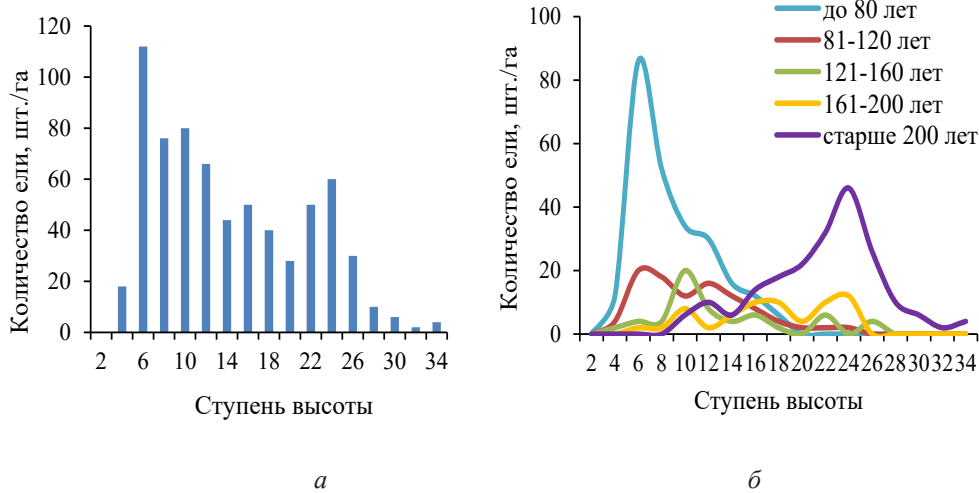


Рис. 4. Распределение ели по ступеням общей высоты древостоя: *a* – общий график; *б* – для деревьев разного возраста

Fig. 4. The distribution of spruce trees by stages of the total stand height: *a* – general graph; *б* – for trees of different ages

Наращение с высотой количества крон, формирующих полог, достигает максимума на высоте 5–8 м и затем постепенно снижается (рис. 5, а). Основной полог обследованного ельника сформирован елью в возрасте 200 лет и более, в то время как ель моложе 80 лет сосредоточена преимущественно в его нижней части (рис. 5, б).

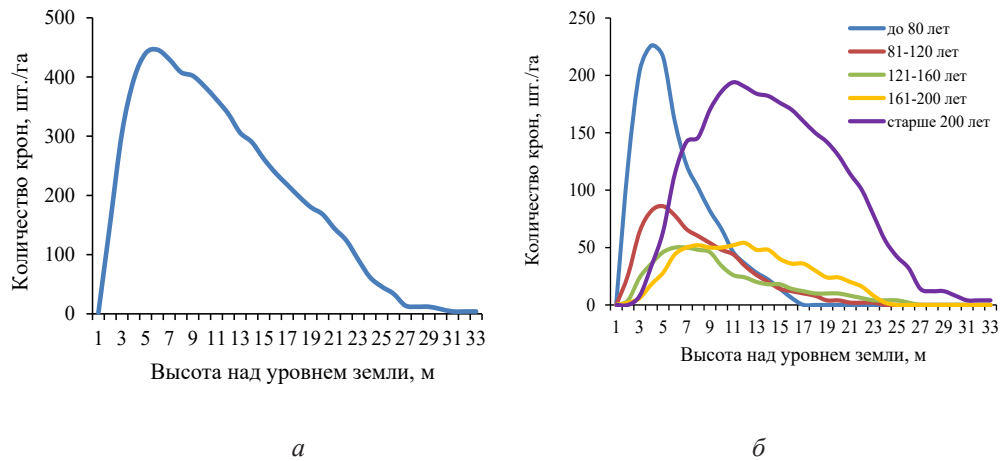


Рис. 5. Распределение численности крон елей по слоям вертикального профиля древостоя: а – общий график; б – для деревьев разных групп возраста

Fig. 5. The distribution of the number of spruce crowns by layers of the vertical profile of the stand: а – general graph; б – for trees of different age groups

Деревья разных групп возраста формируют разные типы вертикальных профилей. Распределение ели возрастных групп до 80 лет и 81–160 лет соответствует типу «регулярная понизу» (основания крон расположены примерно на одинаковой высоте), а распределение ели старших групп возраста соответствует диффузной структуре, при которой древесный полог растянут в вертикальном направлении.

Горизонтальная структура древостоя. Одним из важных показателей горизонтальной структуры древостоя является его сомкнутость, которая выражается соотношением суммы площадей горизонтальных проекций крон деревьев (как правило, без учета площади их перекрытия) к общей площади участка с лесной растительностью. Общая сомкнутость древостоя на ППП составляла 57 % (с учетом перекрытия крон – 48 %). Доля ели в формировании суммарной проекции была 84,3 %, сосны – 5,3 %, березы – 5,4 % и осины – 5,1 %. В среднем площадь проекции кроны ели равна 7 м² (табл. 2). С возрастом дерева этот показатель, как и диаметр кроны, увеличивается, т. к. эти 2 показателя связаны между собой функциональной линейной связью ($r = 0,99$). В целом средние значения для изученного черничного ельника согласуются с данными, полученными для южнотаежных ельников [9].

Таблица 2

Показатели горизонтальной структуры древесного полога в абсолютно разновозрастном черничном ельнике по возрастным поколениям
The parameters of the horizontal structure of the tree canopy in an absolutely uneven-aged blueberry spruce forest by age generations

Показатель	Возрастное поколение ели					Все деревья
	До 80 лет	81–120 лет	121–160 лет	161–200 лет	От 200 лет	
<i>Площадь проекции кроны, м²</i>						
Среднее, м	4,2	5,7	5,9	8,9	10,7	7,0
Ошибка среднего	0,2	0,5	0,6	0,8	0,5	0,2
Коэффициент вариации, %	45,7	59,7	55,2	49,5	44,1	64,5
<i>Диаметр кроны, м</i>						
Среднее, м	2,2	2,6	2,6	3,2	3,6	2,8
Ошибка среднего	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0
Коэффициент вариации, %	22,7	29,1	28,1	25,6	22,9	26,0

Результат анализа взаимосвязи строения кроны и морфологических параметров елей (возраста, диаметра на высоте 1,3 м, высоты и расстояния до 5 ближайших деревьев) приведены в табл. 3. Наибольшие значения корреляции (выше 0,7) между параметрами деревьев и показателями строения крон отмечены для высоты и диаметра, которые между собой связаны сильной линейной зависимостью ($r = 0,96$). Также установлено, что протяженность кроны связана с площадью проекции и диаметром кроны.

Таблица 3

Корреляции между показателями строения кроны и параметрами елей в абсолютно разновозрастном черничном ельнике
The correlations between crown structure parameters and spruce tree parameters in an absolutely uneven-aged blueberry spruce forest

	A , лет	H , м	D , м	R_5 , м	H_k , м	L , м	l , %	D_k , м	S_k , м ²
A , лет	1	0,73	0,76	0,38	0,74	0,65	0,03*	0,61	0,62
H , м	0,73	1	0,96	0,31	0,83	0,96	0,35	0,81	0,81
D , м	0,76	0,96	1	0,32	0,84	0,91	0,27	0,86	0,86
R_5 , м	0,38	0,31	0,32	1	0,26	0,31	0,11*	0,34	0,35
H_k , м	0,74	0,82	0,84	0,26	1	0,67	-0,18	0,65	0,65
L , м	0,65	0,96	0,91	0,31	0,67	1	0,56	0,81	0,81
l , %	0,03*	0,35	0,27	0,11*	-0,18	0,56	1	0,33	0,33
D_k , м	0,61	0,81	0,86	0,34	0,65	0,81	0,33	1	0,99
S_k , м ²	0,62	0,81	0,86	0,35	0,65	0,81	0,33	0,99	1

Примечание: * – недостоверные значения коэффициента (при $p < 0,01$); полужирным шрифтом выделены значения выше 0,7. A – возраст дерева; H – высота дерева; D – диаметр ствола на высоте 1,3 м; R_5 – расстояние до 5 ближайших деревьев; H_k – высота кроны; L – протяженность кроны; l – относительная протяженность кроны; D_k – диаметр кроны; S_k – площадь проекции кроны.

При оценке пространственного размещения елей было выявлено, что в целом все деревья на ППП и, в частности, ель расположены случайно, когда модель пространственных точечных процессов соответствует однородному процессу Пуассона (рис. 6). Однако для ели возрастом менее 80 лет отмечен групповой характер размещения, что объясняется свойственными для массивов еловых лесов ветровальными нарушениями и вывалами деревьев в ходе оконной динамики [16, 27].

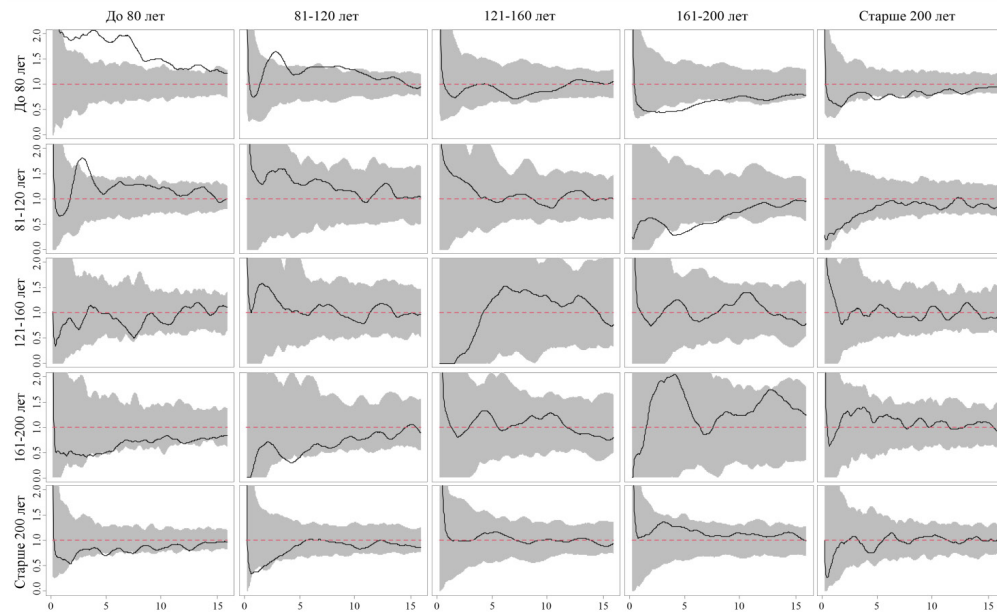


Рис. 6. Анализ размещения в древостое ели разных возрастных групп, выполненный с использованием программы Spatstat (сплошная линия – оценка парной корреляционной функции $g(r)$; серая область – область принятия нулевой гипотезы о случайности размещения древесных растений; ось абсцисс – расстояние, м; ось ординат – значение парной корреляционной функции $g(r)$)

Fig. 6. The analysis of the placement of spruce trees of different age groups in the stand, performed using the Spatstat program (solid line – evaluation of the pair correlation function $g(r)$; gray area – area of acceptance of the null hypothesis about the randomness of placement of woody plants; x-axis – distance, m; y-axis – value of the pair correlation function $g(r)$)

В исследуемом сообществе отмечается равномерное распределение ели 81–120 и 161–200 лет на расстоянии 3–5 м относительно друг друга. Это говорит о том, что деревья этих возрастных групп разобщены, т. е. вокруг елей одной возрастной группы достоверно реже встречаются деревья другой группы. Такую закономерность наблюдали также для коренных северотаежных ельников [6].

Также нами проведена оценка группирования деревьев в зависимости от их категории крупности. Выявлено, что из всех категорий только деревья диаметром до 14 см характеризуются групповым размещением, которое прослеживается на расстоянии 3–7 м. Это в некоторой степени дополняет результаты анализа размещения деревьев разных возрастных групп, а именно по групповому распределению елей до 80 лет. Однако следует отметить, что результат по ди-

аметру ствола менее точный по сравнению с группами возраста, т. к. градации возраста отражают процессы возобновления в лесном сообществе, в то время как анализ групп по толщине ствола указывает на конкурентные отношения между деревьями.

Конкуренция в древостое. В результате изучения конкурентных отношений в древостое у деревьев, испытывающих среднее и сильное воздействие со стороны деревьев в радиусе 10 м, выявлены достоверно низкие морфометрические показатели (высота, диаметр ствола и площадь проекции кроны). Для ели возрастной группы до 80 лет в условиях низкого воздействия со стороны соседних деревьев морфометрические показатели достоверно выше по сравнению с деревьями, подвергающимися среднему и сильному влиянию (рис. 7). Для елей старше 200 лет при усилении конкурентных отношений со стороны соседних деревьев наблюдается снижение перечисленных показателей.

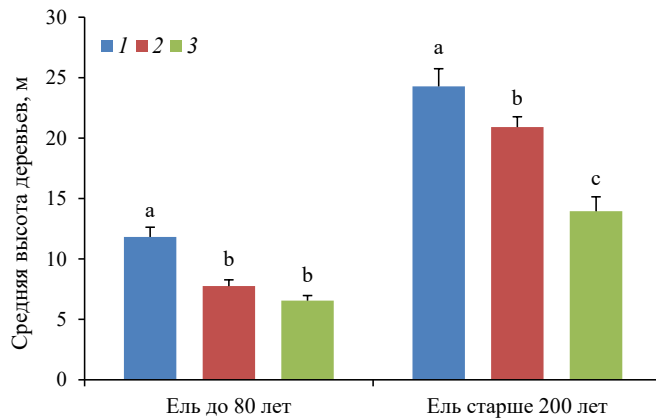


Рис. 7. Средняя высота ели при разной силе воздействия со стороны окружающих деревьев, расположенных на расстоянии до 10 м: 1 – слабое воздействие; 2 – среднее; 3 – сильное. Латинскими буквами обозначены достоверные различия между средними значениями в пределах одной возрастной группы

Fig. 7. The average height of spruce trees at different impact forces from the surrounding trees at a distance of up to 10 m: 1 – weak impact; 2 – medium; 3 – strong. Latin letters indicate significant differences between the average values within the same age group

Кроме того, для деревьев этих 2 возрастных групп устанавливали корреляцию между указанными морфометрическими показателями и индексом конкуренции со стороны соседних деревьев, расположенных на расстоянии до 4, 6, 8, 10 и 12 м. Выявлено, что с увеличением расстояния также растет и коэффициент корреляции. Этот результат говорит о том, что окружающие деревья достоверно влияют на «центральную» ель в радиусе 4 м и далее. Если мы повышаем радиус влияния, суммируя коэффициенты конкуренции от деревьев, находящихся в пределах этого отрезка площади, то связь с морфометрическими показателями центрального дерева продолжает увеличиваться.

Для ели старше 200 лет коэффициенты корреляции слабо меняются уже на расстоянии 8–10 м и далее. Мы предполагаем, что в пространственном распределении деревьев этой возрастной стадии большую роль играет корневая конкуренция. Такие деревья обладают превосходящей высотой в древостое, что снижает их борьбу с окружающими деревьями за свет, и расположены равномернее по сравнению с молодыми елями. Радиус корневой системы ели превышает радиус ее кроны в 2–3 раза [11]. Согласно К.С. Бобковой [2], в спелом чернично-зеленомошном ельнике корни ели распространяются в радиусе 8–10 м. Таким образом, крупные деревья за пределами отмеченного расстояния, вероятно, не являются заметными конкурентами за воду и элементы почвенного питания для центральной ели.

Для елей возрастом до 80 лет выявлено увеличение коэффициентов корреляции между показателями дерева и суммарным индексом конкуренции со стороны ближайших деревьев на расстоянии до 12 м. Молодым елям свойственно групповое размещение, т. к. массовое появление всходов в старовозрастном еловом лесу с регулярными вывалами деревьев приурочено к окнам и старым валежным стволам [12, 21]. В дальнейшем по мере роста ели в куртинах происходит самоизреживание. При этом одновременно наблюдается и воздействие деревьев старшего возраста на рост молодых елей, расположенных на расстоянии 10 м и более.

Заключение

При долговременном естественном развитии среднетаежных черничных ельников формируются абсолютно разновозрастные, среднеполнотные устойчивые фитоценозы. Установленные особенности возрастной и пространственной структур древостоя, а также естественного возобновления на данной стадии развития сообщества соответствуют коренным климаксовым ельникам. Непрерывность и постоянство существования коренного разновозрастного ельника обеспечивается наличием крупномерного подроста, которого в исследуемом массиве насчитывалось до 1,8 тыс. шт./га, при общем количестве подроста – 8,9 тыс. шт./га. Его достаточно для пополнения числа стволов основной части древостоя, а в дальнейшем – для накопления запаса различных поколений ели.

Большинство показателей вертикальной и горизонтальной структур древесного полога в изученном черничном ельнике увеличиваются с возрастом дерева. Исключение составляет относительная протяженность кроны, варьирующая незначительно и согласующаяся со значениями, определенными для ельников разных условий местопроизрастания.

Пространственное размещение всех деревьев в целом, а также елей возрастных групп старше 80 лет в исследованном древостое носит случайный характер. Для ели до 80 лет выявлен групповой характер размещения, что обусловлено особенностями ее возобновления.

Изучение конкурентных отношений между деревьями позволило установить уменьшение морфометрических показателей деревьев при увеличении воздействия на них ближайших деревьев. Корреляционный анализ связи биометрических показателей дерева и коэффициента конкурентного влияния со стороны ближайших деревьев в радиусе от 4 до 12 м для ели старше 200 лет показал воздействие на расстоянии до 8 м, а для деревьев до 80 лет – до 12 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ананьев В.А., Раевский Б.В. Методическое пособие по организации и ведению лесного мониторинга на особо охраняемых природных территориях Северо-Запада России (на примере НП «Водлозерский»). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 47 с.

Ananyev V.A., Rayevsky B.V. *Methodological Manual for the Organization and Management of Forest Monitoring in Specially Protected Natural Areas of the North-West of Russia (Using the Example of the Vodlozersky National Park)*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2010. 47 p. (In Russ.).

2. Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.

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

3. Бобкова К.С., Галенко Э.П., Загирова С.В., Патов А.И. Состав и структура древостоев коренных ельников предгорий Урала бассейна верхней Печоры // Лесоведение. 2007. № 3. С. 23–31.

Bobkova K.S., Galenko E.P., Zagirova S.V., Patov A.I. Composition and Structure of Stands of Native Spruce Forests of the Ural Foothills of the Upper Pechora Basin. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2007, no. 3, pp. 23–31. (In Russ.).

4. Волков А.Д. Биоэкологические основы эксплуатации ельников Северо-Запада таежной зоны России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 250 с.

Volkov A.D. *Bioecological Foundations of Exploitation of Spruce Forests of the North-West Taiga Zone of Russia*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 250 p. (In Russ.).

5. Дыренков С.А. Структура и динамика таежных ельников. Л.: Наука, 1984. 176 с.

Dyrenkov S.A. *The Structure and Dynamics of Taiga Spruce Forests*. Leningrad, Nauka Publ., 1984. 176 p. (In Russ.).

6. Манов А.В., Кутявин И.Н. Горизонтальная структура древостоев и подрост северо-таежных коренных ельников чернично-сфагновых в Приуралье // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 78–88.

Manov A.V., Kutyavin I.N. Horizontal Structure of Forest Stands and New Growth of Northern Taiga Virgin Blueberry-Sphagnum Spruce Forests in Cisurals. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 6, pp. 78–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.78>

7. Манько Ю.И. Пихтово-еловые леса Северного Сихотэ-Алиня: естественное возобновление, строение и развитие: моногр. Л.: Наука, 1967. 244 с.

Man'ko Yu.I. *Fir-Spruce Forests of Northern Sikhote-Alin: Natural Renewal, Structure and Development*: Monograph. Leningrad, Nauka Publ., 1967. 244 p. (In Russ.).

8. Плотников В.В. Эволюция структуры растительных сообществ. М.: Наука, 1979. 276 с.

Plotnikov V.V. *The Evolution of Plant Community Structure*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 276 p. (In Russ.).

9. Пугачевский А.В. Ценопопуляции ели: структура, динамика, факторы регуляции. Минск: Навука і тэхніка, 1992. 204 с.

Pugachevsky A.V. *Spruce Coenopopulations: Structure, Dynamics, Regulatory Factors*. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1992. 204 p. (In Russ.).

10. Пукинская М.Ю. Возобновление темнохвойных пород в очагах усыхания *Picea orientalis* (Pinaceae) в Тебердинском заповеднике (Западный Кавказ) // Бот. журн. 2021. Т. 106, № 12. С. 1167–1179.

Pukinskaya M.Yu. Regeneration of Dark Coniferous Species in the Groups of *Picea Orientalis* (Pinaceae) Dying in the Teberda Nature Reserve (Western Caucasus). *Botanicheskij Zhurnal*, 2021, vol. 106, no. 12, pp. 1167–1179. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0006813621120073>

11. Сеннов С.Н. Рубки ухода за лесом и внутривидовая конкуренция // Восстановление и мелиорация лесов Северо-Запада РСФСР: сб. науч. тр. Л.: ЛенНИИЛХ, 1980. С. 17–27.

Sennov S.N. Forest Thinning and Intraspecific Competition. *Restoration and Melioration of Forests in the North-West of the RSFSR*: Collection of Scientific Papers. Leningrad, Leningrad Research Institute of Forestry Publ., 1980, pp. 17–27. (In Russ.).

12. Смирнова О.В., Коротков В.Н. Старовозрастные леса Пяозерского лесхоза северо-западной Карелии // Бот. журн. 2001. Т. 86, № 1. С. 98–109.

Smirnova O.V., Korotkov V.N. Old-Growth Forests of North-West Karelia Pjaozero Forest Management Unit. *Botanicheskij Zhurnal*, 2001, vol. 86, no. 1, pp. 98–109. (In Russ.).

13. Стороженко В.Г. Физические параметры структур коренных ельников тайги европейской части России // Хвойные бореал. зоны. 2017. Т. 35, № 1–2. С. 60–65.

Storozhenko V.G. Physical Parameters of Selected Structures of Indigenous Spruce Forests of the European Part of Russian Taiga. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*. 2017, vol. 35, no. 1–2, pp. 60–65. (In Russ.).

14. Стороженко В.Г. Особенности горизонтальной структуры лесов еловых формаций европейской тайги России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 39–49.

Storozhenko V.G. Features of the Horizontal Structure of Forests of Spruce Formations in the European Taiga of Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 2, pp. 39–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-39-49>

15. Сукачев В.Н. Динамика лесных биогеоценозов // Основы лесной биогеоценологии. М., 1964. С. 458–486.

Sukachev V.N. Dynamics of Forest Biogeocenoses. *Fundamentals of Forest Biogeocenology*. Moscow, 1964, pp. 458–486. (In Russ.).

16. Федорчук В.Н., Шорохов А.А., Шорохова Е.В., Кузнецова М.Л., Тетюхин С.В. Массивы коренных еловых лесов: структура, динамика, устойчивость. СПб.: Политехн. ун-т, 2012. 140 с.

Fedorchuk V.N., Shorokhov A.A., Shorokhova E.V., Kuznetsova M.L., Tetyukhin S.V. *Indigenous Spruce Forests: Structure, Dynamics, Stability*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2012. 140 p. (In Russ.).

17. Baddeley A., Turner R. Spatstat: An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns. *Journal of Statistical Software*, 2005, vol. 12, iss. 6, pp. 1–42. <https://doi.org/10.18637/jss.v012.i06>

18. Burrascano S., Keeton W.S., Sabatini F.M., Blasi C. Commonality and Variability in the Structural Attributes of Moist Temperate Old-Growth Forests: A Global Review. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 291, pp. 458–479. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.020>

19. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*. Rome, FAO, 2020. 184 p. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>

20. Kuuluvainen T., Wallenius T.H., Kauhanen H., Aakala T., Mikkola K., Demidova N., Ogibin B. Episodic, Patchy Disturbances Characterize an Old-Growth *Picea abies* Dominated Forest Landscape in Northeastern Europe. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 320, pp. 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.024>

21. McCarthy J. Gap Dynamics of Forest Trees: a Review With Particular Attention to Boreal Forests. *Environmental Reviews*, 2001, vol. 9, no. 1, pp. 1–59. <https://doi.org/10.1139/a00-012>

22. Morales-Hidalgo D., Oswalt S.N., Somanathan, E. Status and Trends in Global Primary Forest, Protected Areas, and Areas Designated for Conservation of Biodiversity from the Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 352, pp. 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.011>

23. Nygaard P.H., Strand L.T., Stuanes A.O. Gap Formation and Dynamics after Long-Term Steady State in an Old-Growth *Picea abies* Stand in Norway: Above- and Belowground Interactions. *Ecology and Evolution*, 2018, vol. 8, iss. 1, pp. 462–476. <https://doi.org/10.1002/ece3.3643>

24. Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A New Global Map of Terrestrial Ecoregions Provides an Innovative Tool for Conserving Biodiversity. *BioScience*, 2001, vol. 51, iss. 11, pp. 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)

25. Packham J.R., Harding D.J.L., Hilton G.M., Stuttard R.A. *Functional Ecology of Woodlands and Forests*. London, Chapman & Hall, 1992. 407 p. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90248-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)90248-8)

26. Pukkala T., Kolström T. Competition Indices and the Prediction of Radial Growth in Scots Pine. *Silva Fennica*, 1987, vol. 21, no. 1, art. no. 5306. <https://doi.org/10.14214/sf.a15463>

27. Shorohova E., Kuuluvainen T., Kangur A., Jõgiste K. Natural Stand Structures, Disturbance Regimes and Successional Dynamics in the Eurasian Boreal Forests: a Review with Special Reference to Russian Studies. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, art. no. 201. <https://doi.org/10.1051/forest/2008083>

28. Wirth C., Messier C., Bergeron Y., Frank D., Fankhänel A. Old-Growth Forest Definitions: a Pragmatic View. *Old-Growth Forests: Function, Fate and Value*, 2009, pp. 11–33. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92706-8>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья
УДК 630.521.2
DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-42-57

Вариативность диаметров деревьев в древостоях липы мелколистной

А.К. Габделхаков¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

В.Ф. Коновалов¹, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-5540>

З.З. Рахматуллин¹, канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3223-6726>

М.В. Мартынова¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [G-4659-2018](https://orcid.org/0000-0002-8804-8425),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8804-8425>

И.И. Фазлутдинов², вед. специалист; *ResearcherID*: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0327-3752>

¹Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, д. 34, г. Уфа, Россия, 450001; aliya201199@mail.ru[✉], vfkonovalov@bk.ru, zagir1983@mail.ru, maaarussia@mail.ru

²Министерство лесного хозяйства Республики Башкортостан, ул. Ленина, д. 86, г. Уфа, Россия, 450006; solnc2007@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.06.23 / Одобрена после рецензирования 11.09.23 / Принята к печати 13.09.23

Аннотация. Информация о распределении деревьев по ступеням толщины в древостоях необходима для планирования выборочных рубок и формирования экологически устойчивых и экономически ценных насаждений. Целью данной статьи является характеристика и сравнение структурного разнообразия распределения диаметров деревьев смешанных одно- и двухвозрастных древостоев *Tilia cordata* Mill., произрастающих в условиях Архангельского лесничества Республики Башкортостан. По данным 25 временных пробных площадей кластерным анализом и методом визуализации по эмпирическим данным распределений диаметров деревьев выделено 4 унимодальных структурных типа распределений и нисходящий (обратной J-образной формы). Среди исследованных двухвозрастных древостоев распределения древостоев по диаметрам на высоте груди с 2 пиками (бимодальность) не наблюдается. Установлено, что коэффициенты вариации диаметров устойчиво снижаются с возрастом древостоя (коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,57$ при $p = 0,003$) и увеличением доли участия липы в его составе ($r = -0,71$ при $p < 0,001$), а ряды распределения характеризуются правосторонней асимметрией. Разнообразие размеров деревьев оценивалось на основе данных о площадях поперечного сечения с использованием индексов Шеннона, Симпсона, Джини и Сийпилехто. Сравнение индексов Шеннона и Симпсона показало, что структурное разнообразие диаметров деревьев было более сложным в двухвозрастных лесах по сравнению с одновозрастными. Оба индекса обеспечили четкое деление исследованных двухвозрастных древостоев на 2 унимодальных типа распределения диаметров. Индекс Джини (0,28–0,52) свидетельствовал о широком уровне структурного разнообразия и достигал высоких значений (0,48–0,52), когда распределение диаметров было близко к

нисходящему. Большие индексы Сийпилехто (0,63–1,05) подтвердили унимодальность распределений диаметров древостоев, в т. ч. для пикообразного типа. Сделан вывод, что кластерный анализ и применение индексов размерного разнообразия диаметров позволяют лучше понять структуру строения липняков, а индексы для древостоев липы должны стать частью их дальнейших лесоводственных оценок.

Ключевые слова: распределение по диаметру, индексы, типы структуры, липа мелколистная, Республика Башкортостан

Для цитирования: Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Мартынова М.В., Фазлутдинов И.И. Вариативность диаметров деревьев в древостоях липы мелколистной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 42–57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-42-57>

Original article

Variability of Tree Diameters in Small-Leaved Linden Stands

Aydar K. Gabdelkhakov[✉], Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

Vladimir F. Kononov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-5540>

Zagir Z. Rakhmatullin¹, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3223-6726>

Maria V. Martynova¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-4659-2018](https://orcid.org/0000-0002-8804-8425),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8804-8425>

Ilyas I. Fazludinov², Leading Specialist; ResearcherID: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0327-3752>

¹Bashkir State Agrarian University, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34, Ufa, 450001, Russian Federation; aliya201199@mail.ru[✉], vfkononov@bk.ru, zagir1983@mail.ru, maaarussia@mail.ru

²Ministry of Forestry of the Republic of Bashkortostan, ul. Lenina, 86, Ufa, 450006, Russian Federation; solnc2007@yandex.ru

Received on June 19, 2023 / Approved after reviewing on September 11, 2023 / Accepted on September 13, 2023

Abstract. Information on the distribution of trees by thickness grades in stands is necessary for planning selective fellings and the formation of environmentally sustainable and economically valuable plantations. The aim of this article is to characterize and compare the structural diversity of tree diameter distribution in mixed one- and two-age stands of *Tilia cordata* Mill. growing in the Arkhangelsk forestry of the Republic of Bashkortostan. Based on the data from 25 temporary sample plots, cluster analysis and visualization method based on empirical data of tree diameter distributions have identified 4 unimodal structural types of distributions and a descending (reverse J-shaped) one. Among the studied two-aged stands, distribution of stands by diameter at breast height with 2 peaks (bimodality) is not observed. It has been found that the coefficients of diameter variation steadily decrease with the age of the tree stand (Pearson correlation coefficient $r = -0.57$ at $p = 0.003$) and an increase in the proportion of linden in the forest stand ($r = -0.71$ at $p < 0.001$), and the distribution series are characterized by right-sided asymmetry. Tree size diversity has been assessed based on cross-sectional area data using the Shannon, Simpson, Gini and Siipilehto indices. A comparison of the Shannon and Simpson indices has shown that the structural diversity of tree diameter has been more

complex in two-aged forests compared to one-aged ones. Both indices have provided a clear division of the studied two-aged stands into 2 unimodal types of diameter distribution. The Gini index (0.28–0.52) has indicated a high level of structural diversity and has reached high values (0.48–0.52) when the diameter distribution has been close to downward sloping. Large values of the Siipilehto index (0.63–1.05) have confirmed the unimodality of the diameter distributions of the stands, including for the peak-shaped type. It has been concluded that cluster analysis and the use of indices of dimensional diversity of diameters allow a better understanding of the structure of linden forests, and the indices for linden stands should become part of their further forestry assessments.

Keywords: diameter distribution, indices, structural types, small-leaved linden, the Republic of Bashkortostan

For citation: Gabdelkhakov A.K., Konovalov V.F., Rakhmatullin Z.Z., Martynova M.V., Fazlutdinov I.I. Variability of Tree Diameters in Small-Leaved Linden Stands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 42–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-42-57>

Введение

Принципы многоцелевого и экологически обоснованного лесопользования требуют информации как о текущем, так и о будущем состоянии древостоев [32]. Подобная информация, особенно в региональном масштабе, в виде моделей роста и продуктивности для разработки эффективных планов управления развитием в существующих сложных лесных экосистемах различных древесных видов недостаточна [5, 34]. Одним из полезных инструментов для создания моделей роста и продуктивности древостоев является частотное распределение диаметров отдельных древесных видов [7, 20, 33]. Лесоводы заинтересованы в оценке распределения деревьев по ступеням толщины в древостоях [18, 21], поскольку диаметр вместе с другими количественными и качественными показателями ствола определяет сортиментную структуру и, следовательно, цену древесины [20, 36]. По характеру распределения диаметров деревьев древостоя можно судить о его структуре [19, 22, 24], стадии развития древостоя [13], устойчивости [6], проектировать рубки и анализировать их результаты [10, 17, 37]. Показатели, описывающие разнообразие размеров деревьев в древостоях, позволяют оценить экономическую, экологическую и социальную ценности режимов управления как для одновозрастных, так и для разновозрастных насаждений. Эти показатели имеют несколько потенциальных применений в качестве инструментов планирования лесопользования в целом [20].

Различия в размерах деревьев в насаждениях обусловлены геоморфологической неоднородностью среды, возрастом, конкуренцией видов, скоростью роста, воздействием человека и животных, генетическими свойствами, влиянием вредителей и болезней леса, стихийных явлений [5, 12, 28]. В естественных лесах структура распределения диаметров деревьев часто значительно различается даже среди насаждений одного возраста (сукцессионная стадия), а также типа древостоя (старовозрастные, управляемые одновозрастные и разновозрастные, вторичные неуправляемые) [8]. Структура распределения диаметров на высоте груди (*dbh*-распределения) в естественных лесах может быть унимодальной, мультимодальной, уменьшающейся и неравномерной [22].

Количество выделяемых типов *dbh*-распределений в различных исследова-

ниях варьирует: S. Rouvinen и T. Kuuluvainen [31] называют 3 (униmodalный, бимodalный и нисходящий типы); Valbuena et al. [36] – 4 (одинакового размера, равномерный, бимodalный и обратный J-образный); M. Pach и R. Podlaski [29] – 6, в их числе 3 униmodalных разного диапазона ширины *dbh* (в основном для управляемых насаждений), обратный J-образный, ротационно-сигмовидный и бимodalный (для неуправляемых насаждений).

Описание размерной структуры лесов осуществляется с помощью ряда индексов [20, 28, 36], которые рассчитываются на основе числа деревьев, диаметра на высоте 1,3 м, площади сечения, расстояния между деревьями и др. Индекс структурной сложности древостоя представляет собой математическую конструкцию, суммирующую эффекты 2 или более структурных атрибутов 1 числом [24]. Наиболее часто применяются индексы Шеннона, Симпсона и Джини, представляющие различные свойства размерной структуры древостоев [9]. Индекс Джини – это показатель неоднородности, используется как мера для сравнения диапазона, индекс Симпсона определяется как показатель доминирования или концентрации, а индекс Шеннона – как показатель равномерности распределения по всем ступеням толщины. Эти 3 индекса не меняются при увеличении плотности каждого класса диаметров в одинаковой пропорции, что позволяет сравнивать разнообразие диаметров в одном или разных насаждениях с течением времени, независимо от их плотности [14, 20].

Естественные леса из липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) составляют значительную часть лесного фонда Республики Башкортостан, занимая около 1,2 млн га, что составляет более 22 % от общей площади лесных угодий региона [2]. Несмотря на широкую распространенность липняков, исследования структуры насаждений этого вида очень ограничены [15], в т. ч. в горно-лесной зоне республики [1]. Оценка и сравнение разнообразия диаметров как одновозрастных, так и разновозрастных древостоев липы отсутствуют.

Цель данного исследования – оценка и сравнение структурного разнообразия *dbh*-распределения деревьев в смешанных одно- и двухвозрастных насаждениях *Tilia cordata* Mill., произрастающих в условиях Архангельского лесничества Республики Башкортостан.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования расположены в лесостепной лесорастительной зоне Южно-Уральского лесостепного района (54°5' с. ш. 56°8' в. д.). Климат территории резко континентальный. Многолетние данные получены с метеорологической станции с. Архангельское. Среднегодовая температура воздуха – 2–3 °С. Годовая сумма осадков – около 600–700 мм и более, в т. ч. 400–450 мм за вегетационный период, который длится с мая по сентябрь. Средняя продолжительность безморозного периода с температурой выше 10 °С – 130–140 дней.

В Архангельском лесничестве республики липа – одна из самых распространенных и ценных пород деревьев, здесь на нее приходится более 85 тыс. га (43 %) площади лесного фонда. Она образует как смешанные, так и чистые древостои, большая их часть является одновозрастными, но значительные территории представлены и разновозрастными насаждениями.

Изучение распределения деревьев по диаметрам проведено по данным пробных площадей (ПП), заложенных в 15 одно- и 10 двухвозрастных смешанных порослевых насаждениях липы снытьевой группы типов леса. Почвы ПП

определены нами как серые лесные среднесуглинистые. ПП прямоугольной формы заложены размером 0,25–1,00 га, что обусловлено необходимостью получить достаточное количество наблюдений для подгонки *dbh*-распределений. Насаждения были выбраны в соответствии со следующими критериями: 1) преобладание липы по запасу; 2) разное доленое участие древесных видов при доминировании липы; 3) охват древостоев разной полноты и возраста; 4) площадь насаждений не менее 5,0 га. Все деревья толще 6,0 см были идентифицированы по видам, а их диаметры измерены в 2 перпендикулярных направлениях по 4-сантиметровым ступеням толщины. В общей сложности на 25 ПП обследовано 8040 деревьев. Высота (*h*) 3–5 деревьев каждой ступени толщины установлена высотомером Блюма–Лейсса с точностью до 0,5 м для построения графика и оценки разряда высот. Запас древостоев рассчитан по региональным сортиментным таблицам. На каждой ПП у 1–5 доминирующих видов деревьев возрастным буровом извлекали керны у оснований стволов для определения возраста (*A*). Для каждой ПП рассчитаны следующие переменные древостоя: средний квадратический диаметр (*DBH*), количество деревьев на гектаре (*N*), сумма площадей сечений древостоя (*G*), средняя высота (*H*) и запас (*M*).

Выявление закономерностей *dbh*-распределения на начальном этапе исследования было основано на кластерном анализе по иерархическому агломеративному методу (древовидная кластеризация). Каждая ПП рассматривалась как ветвь, в которой переменные – количество деревьев в 4-сантиметровых ступенях толщины с интервалом от 8 до 64 см. Группировка ближайших ПП в кластеры осуществлялась методом Ward, принимающим за меру рассеивания Евклидово расстояние [18, 30]. Метод Ward обеспечивает сильную кластеризацию и широко применяется при кластерном анализе количественных переменных [18], без учета требования нормальности распределения случайных величин. Далее, ориентируясь на результаты иерархического кластерного анализа, провели кластеризацию методом *k*-средних. Минимальное количество кластеров было подобрано таким образом, чтобы дисперсионным анализом добиться значимого уровня различия ($p = 0,05$) для каждой ступени толщины по F-критерию.

На следующем этапе исследования различия *dbh*-распределения между ПП сравнивались путем визуальной интерпретации исходного распределения диаметров, анализа выборочных статистик и сравнения индексов: Шеннона (*SEI*), Симпсона (*D*), Джини (*GI*) и Сийпилехто (*Ψ*). Визуально на графиках оценивались диапазон распределения диаметров, количество пиков, стволов липы и всех пород.

Для обобщенных (по всем древесным породам) рядов *dbh*-распределений ПП вычислены основные статистики: размер выборки (*n*), среднее арифметическое значение (*Dm*), медиана (*Me*), коэффициенты вариации (*Cv*), асимметрии (*As*) и эксцесса (*Es*). *Cv* часто используется для количественной оценки разнообразия размеров деревьев в пределах насаждения: если все деревья имеют одинаковый диаметр, то $Cv = 0$, увеличение *Cv* указывает на рост изменения диаметров деревьев [11, 38]. *Cv* измеряет относительную, а не абсолютную вариацию, что позволяет проводить прямое перекрестное сравнение между насаждениями [13]. Асимметрия распределения диаметров является мерой разнообразия и отклонения от симметрии нормального распределения [23].

Положительные значения As указывают на правостороннее распределение, что характерно для разновозрастных насаждений, тогда как однородные насаждения обычно имеют симметричное распределение. Es является мерой толщины или тяжести хвостов dbh -распределения, описывает его форму (или остроту), на этот коэффициент, как правило, больше влияют несколько крайних отличий от среднего значения, чем множество небольших [23]. Cv , As и Es – пространственно неявные меры структурного разнообразия [35].

Стандартизированный индекс равномерности Шеннона рассчитывался следующим образом [4]:

$$SEI = \frac{-\sum_{i=1}^k p_i \ln p_i}{\ln k},$$

где p_i – доля площади сечения деревьев в ступени толщины i , $m^2 \cdot га^{-1}$; k – количество ступеней толщины.

Максимальный индекс Шеннона, равный 1, достигается, когда площади сечений равны для всех ступеней толщины. Минимальное значение – 0, в этом случае все деревья относятся к одной ступени [20]. SEI зависит от ступени толщины: уменьшается с увеличением ширины ступени при уменьшении количества ее представленности в древостое [27].

Индекс разнообразия Симпсона находится по формуле [26, 27]:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^k p_i^2.$$

D , принимая значения от 0 до 1, интерпретируется как вероятность того, что любые 2 случайно взятых дерева принадлежат к разным классам диаметра [4]. Индекс сильно привязан к наиболее распространенному классу диаметров в выборке, в то же время он менее чувствителен к количеству ступеней толщины [20].

Для характеристики структурного разнообразия каждой ПП использовали индекс Джини в связи с его широким применением в исследованиях леса [3, 10, 17]. Общая формула этого индекса:

$$GI = 1 - \sum_{i=1}^k [(ba_{i-1} + ba_i)(n_i - n_{i-1})],$$

где ba_i (ba_{i-1}) – кумулятивная доля площади сечений деревьев всех ступеней толщины, меньших или равных i -му классу диаметра (для $i = 1$, $ba_{i-1} = 0$); n_i (n_{i-1}) – кумулятивная доля количества деревьев всех ступеней толщины, меньших или равных i -му классу диаметра (для $i = 1$, $n_{i-1} = 0$).

Индекс GI представляет собой отношение между (а) площадью ограниченной кривой Лоренца и диагональю совершенной однородности и (б) всей площадью ниже этой диагонали [9]. GI может принимать значения в диапазоне 0–1. Теоретически, в случае абсолютного неравенства, индекс может быть максимальным – 1,0. Однако на практике его наибольшее значение для лесных насаждений – 0,8. Когда все деревья на участке имеют одинаковые dbh , $GI = 0$. GI не зависит от густоты и общей суммы площадей сечений древостоя, что позволяет проводить сравнение между насаждениями [13, 19].

Все 3 индекса легко рассчитываются по данным обычной таксации, интерпретируются и быстро сравниваются. Расчет этих индексов для

описания распространенности каждой ступени толщины вельса по площади сечения, что позволяет учесть более крупные деревья, встречающиеся на ПП [20, 25].

Для описания формы *dbh*-распределений всех древесных пород ПП рассчитан индекс формы Сийпилехто [33]:

$$\Psi = \frac{G}{g_m N},$$

где G – сумма площадей сечений древостоя, $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$; g_m – взвешенное по площади сечения медианное дерево, м^2 ; N – общее количество деревьев, экз. $\cdot \text{га}^{-1}$.

Если *dbh*-распределение напоминает пикообразное унимодальное распределение, $\Psi \approx 1,0$; унимодальные распределения – $0,54 < \Psi < 1,0$. Значения уменьшаются с увеличением отклонения диаметров и асимметрии вправо. Когда *dbh*-распределение однородно по форме или напоминает перевернутую букву J, Ψ уменьшается примерно до 0,54 и 0,48 соответственно [31].

Все расчеты и статистический анализ выполнены с использованием приложений Microsoft Excel и Statistica.

Результаты исследования и их обсуждение

Все пробные площади располагались в естественных смешанных насаждениях с преобладанием липы в составе 5–10 ед. Древостои характеризуются разным соотношением участия дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.), вяза (*Ulmus glabra* Huds.), березы повислой (*Betula pendula* L.) и осины (*Populus tremula* L.). Средний квадратический диаметр деревьев на ПП варьируют от 13 до 38 см (табл. 1). Сумма площадей сечений древостоя изменяется в широком диапазоне – от 18 до 52 $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$, как и запас – от 155 до 528 $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$. Они зависят как от возраста (40–95 лет), так и от густоты древостоев (494–1300 экз. $\cdot \text{га}^{-1}$). Средний возраст указан только для липы. Возраст сопутствующих видов в одновозрастных древостоях был почти таким же, кроме крупных единичных деревьев дуба на ПП 15 – 130 лет. Анализ ПП по основным таксационным показателям подтверждает, что подобранные для изучения древостои II и III классов бонитета по происхождению, составу и полноте (0,4–1,0) отвечают наиболее распространенным условиям формирования липняков района исследования.

С помощью кластерного анализа по иерархическому агломеративному методу были установлены 5 кластеров *dbh*-распределений. На дендрограмме (рис. 1) по вертикальной оси показаны объединяемые в кластеры ПП (ветви, с присвоенными идентификационными литерами), а по горизонтали – Евклидово расстояние между ними. Большая протяженность Евклидова расстояния означает меньшее сходство между ПП. Дендрограмма отражает слияние ветвей в 4 крупных кластера, которые, с небольшими вариациями, объединяют одновозрастные и разновозрастные древостои, ПП 22 образует обособленный кластер. Каждый цветной прямоугольник на рис. 1 представляет собой различный кластер *dbh*-распределения.

Таблица 1

Основные таксационные характеристики пробных площадей
The main inventory characteristics of the sample plots

ПП	А, лет	Состав	Н, м	DBH, см	N, экз.·га ⁻¹	G, м ² ·га ⁻¹	M, м ³ ·га ⁻¹
<i>Одновозрастные древостои</i>							
1	70	9Лп1Б+Д+В+Кл	19,8	35	664	50,03	458
2	65	10Лп +В	16,9	22	848	30,60	267
3	55	7Лп2Д1В+Б	19,8	22	586	24,79	232
4	45	6Лп2В1Д1Б+В	16,7	17	1140	32,73	293
5	40	6Лп2Д2В	14,4	13	1300	25,79	225
6	55	5Лп5Ос+Д+В	16,5	19	890	27,37	237
7	55	5Лп3Д1В1Б	17,7	19	1064	36,45	323
8	55	9Лп1В	17,8	20	951	32,62	365
9	55	7Лп2Д1Б+В	17,6	19	1077	37,41	447
10	55	6Лп3Д1Кл+В	16,5	15	944	21,78	188
11	55	8Лп1Д1В+Б+Ос	19,4	23	735	31,23	283
12	75	8Лп2Б+В+Ос	21,6	26	704	32,51	296
13	55	8Лп1Д1В+Б	20,1	23	494	21,36	192
14	50	5Лп3Б1Д1В	16,4	17	590	18,28	155
15	55	8Лп1Д1Б+Ос	16,1	23	654	31,11	257
<i>Двухвозрастные древостои</i>							
16	90/65	6Лп3Лп1Б+Ос	22,2/17,9	27/18	668	28,15	270
17	90/65	7Лп2Лп1Д+В	22,2/17,7	30/18	573	27,96	276
18	95/75	6Лп3Лп1Д+В+Б	22,1/17,8	36/25	595	46,47	465
19	90/65	6Лп3Лп1Ос	21,9/17,7	31/19	542	27,69	272
20	95/65	6Лп3Лп1Ос+В+Б	23,6/19,8	34/25	545	38,25	386
21	80/60	7ЛпП3Лп+Д _н +В	22,7/18,6	30/20	352	18,45	187
22	70/55	6Лп3Лп1Ос	22,8/18,9	28/21	560	27,39	281
23	80/50	6Лп3Лп1Ос+В	22,2/17,9	35/25	451	32,37	323
24	95/75	6Лп3Лп1Д _н +В+Кл	22,4/18,0	38/28	618	52,09	528
25	90/60	6Лп3Лп1Д _н +В	21,9/18,0	30/23	668	38,79	382

Результаты последовательной кластеризации методом *k*-средних с заданием 3–5 кластеров показали, что при 3 кластерах различия между ПП в *dbh*-распределении незначительны. Начиная с 4 кластеров *dbh*-распределения ПП имеют существенную разность по F-критерию при уровне значимости $p < 0,01$. Задание 5 кластеров приводит к аналогичному с иерархическим методом результату.

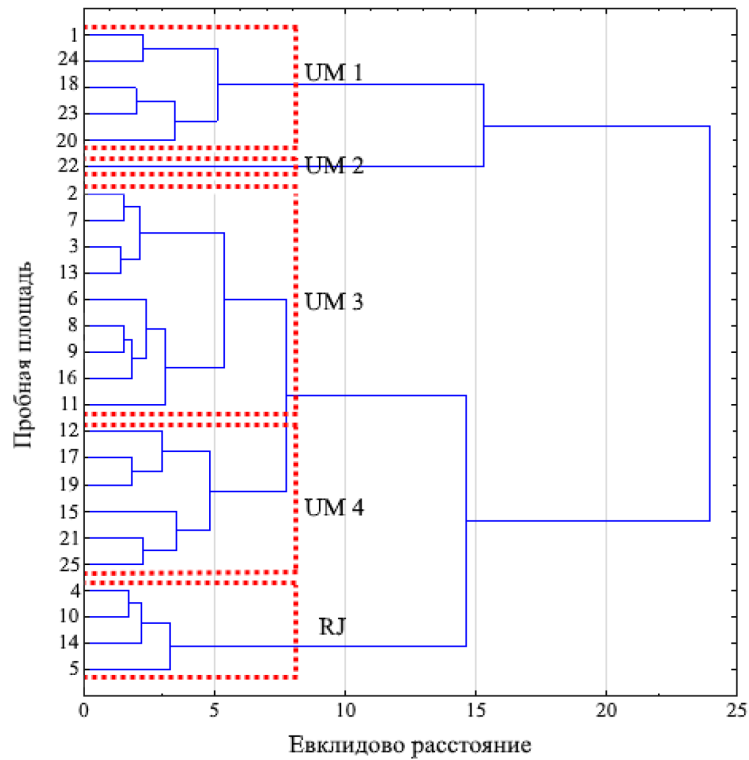


Рис. 1. Дендрограмма иерархического агломеративного кластерного анализа *dbh*-распределения исследованных липняков

Fig. 1. The dendrogram of hierarchical agglomerative cluster analysis of the *dbh*-distribution of the studied linden forests

Каждый кластер визуализирован отдельно по эмпирическим данным *dbh*-распределений ПП, их наиболее характерные примеры представлены на рис. 2. На основе визуального анализа обнаружено, что исследованные древостои сформировали следующие структурные типы *dbh*-распределений: 1) UM1 – унимодальный с *DBH* от 34 до 38 см, включает 4 двухвозрастные ПП и 1 одновозрастную (ПП 1); 2) UM2 – унимодальный с *DBH* 28 см, его составляет двухвозрастный древостой; 3) UM3 – унимодальный с *DBH* от 19 до 27 см, включает 8 одновозрастных ПП и 1 двухвозрастную (ПП 16); 4) UM4 – унимодальный с *DBH* от 23 до 31 см, в него входят 2 одновозрастные ПП (ПП 12 и 15) и 4 двухвозрастные; 5) RJ – нисходящий (обратной J-образной формы) с *DBH* от 13 до 17 см, объединяет 4 одновозрастные ПП. Среди исследованных двухвозрастных древостоев *dbh*-распределения с 2 пиками (бимодальность) не наблюдается.

Широкий диапазон *dbh*-распределения деревьев присущ как одно-, так и двухвозрастным древостоям. Крупные деревья с *DBH* > 40 см отмечены в 22 древостоях. В среднем количество таких деревьев составляет 25 экз.·га⁻¹, при максимальном количестве 87 экз.·га⁻¹ (ПП 24). Диапазон распределения диаметров деревьев на ПП различается даже в пределах одного возраста (55-летние древостои). Например, если на ПП 3 деревья представлены ступенями толщины от 8 до 60 см, то на ПП 6 – только до 32 см.

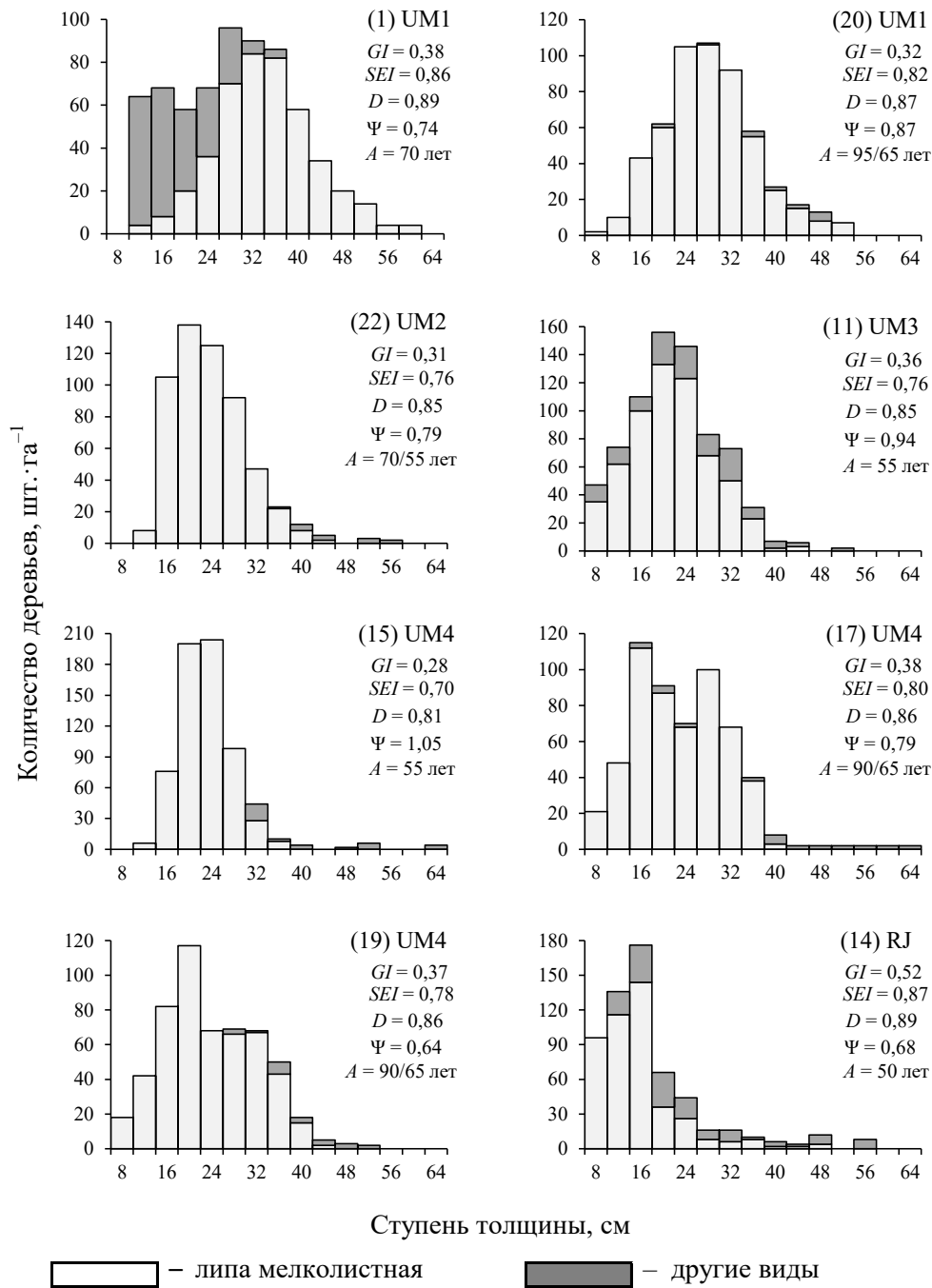


Рис. 2. *Dbh*-распределения исследованных липняков. В круглых скобках – порядковый номер пробной площади, справа от них – структурный тип

Fig. 2. The *dbh*-distributions of the studied linden forests. In parentheses is the serial number of the sample plot, to the right of them is the structural type

Таблица 2

Статистические показатели и индексы *dbh*-распределений пробных площадей
The statistical indicators and indices of *dbh*-distributions of the sample plots

ПП	n	Dm	Me	min	max	Cv	As	Es	Ψ	SEI	D	GI
<i>Одновозрастные древостои</i>												
1	332	29,0	28	12	60	37,3	0,25	-0,47	0,74	0,86	0,89	0,38
2	212	20,4	20	8	40	33,1	0,03	-0,14	0,80	0,67	0,81	0,32
3	293	20,9	20	8	60	46,4	1,52	3,01	0,69	0,89	0,90	0,46
4	285	17,0	16	8	60	51,9	2,12	6,94	0,63	0,82	0,87	0,48
5	325	14,1	12	8	48	51,8	2,78	9,23	0,78	0,73	0,84	0,50
6	356	18,8	20	8	32	32,8	-0,21	-0,83	0,68	0,59	0,77	0,32
7	266	19,2	20	8	48	42,3	0,68	0,08	0,76	0,80	0,87	0,42
8	285	20,2	20	10	44	27,3	0,93	2,12	0,76	0,64	0,79	0,28
9	323	20,0	20	10	40	33,4	0,84	0,65	0,77	0,73	0,84	0,36
10	236	15,4	12	8	52	48,9	2,09	6,23	0,73	0,80	0,87	0,48
11	442	21,9	20	8	52	35,7	0,36	0,04	0,94	0,76	0,85	0,36
12	352	22,5	24	8	48	39,7	0,02	-0,65	0,75	0,75	0,84	0,38
13	269	21,7	20	8	56	39,3	1,29	2,35	0,64	0,82	0,86	0,40
14	295	17,5	16	8	56	54,0	1,95	4,35	0,68	0,87	0,89	0,52
15	327	23,7	24	12	64	27,6	2,41	10,72	1,05	0,70	0,81	0,28
<i>Двухвозрастные древостои</i>												
16	334	22,2	20	8	56	31,8	1,06	2,42	0,93	0,77	0,85	0,33
17	344	23,4	24	8	64	37,7	0,77	1,65	0,79	0,80	0,86	0,38
18	358	30,0	28	12	64	29,7	0,36	-0,14	0,77	0,78	0,87	0,31
19	325	24,0	24	8	52	36,0	0,35	-0,37	0,64	0,78	0,86	0,37
20	327	28,6	28	8	64	30,6	0,71	1,18	0,87	0,82	0,87	0,32
21	352	24,7	24	12	64	30,6	0,74	1,85	0,85	0,77	0,85	0,32
22	336	23,9	24	12	56	29,2	1,13	2,15	0,79	0,76	0,85	0,31
23	361	29,1	28	12	56	28,2	0,57	0,06	0,89	0,80	0,87	0,30
24	371	31,0	32	8	60	34,1	0,39	-0,05	0,83	0,86	0,89	0,35
25	334	26,2	24	12	56	27,5	0,98	1,00	0,94	0,76	0,86	0,29

Представленность сопутствующих видов по ступеням толщины на ПП варьирует. На ПП1 и ПП2 примесь зафиксирована в ступенях толщины ниже средней, на ПП 8, 15 и 19 наоборот – выше средней, а на ПП 5 и 22 другие породы – только крупные деревья дуба и вяза, осины соответственно. На остальных ПП количество примеси по ступеням толщины либо распределено равномерно (ПП 4, 11 и 23), либо соотношение сильно различается. Например, на ПП 12 вяза больше в ступенях толщины 8–24 см, а береза с осиной встречаются по несколько экземпляров в ступенях толщины 24 см и выше.

Статистические показатели *dbh*-распределений обобщенных рядов сведены в табл. 2. *Dm* для отдельных объектов составляет от 14 до 31 см. Коэффициент вариации, являющийся показателем однородности строения древостоя, изменяется от 27 до 52 %, устойчиво снижаясь с возрастом древостоя (коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,57$ при $p = 0,003$) и увеличением доли липы в его составе ($r = -0,71$ при $p < 0,001$). На ПП 6 *dbh*-распределение характеризуется левосторонней асимметрией ($-0,21$), на остальных – правосторонней, причем на 10 из них *As* превышает 1,0. *Dbh*-распределения характеризуются различной степенью уплощения – от 0,8 до 10,7. Анализ *As* и *Es* для всех древостоев, кроме ПП 2, показал, что они лежат за пределами своих 2-кратных основных ошибок. Это свидетельствует об отличии данных рядов от нормального распределения. Соответственно, для ПП 2 оценки достоверности *As* и *Es* по *t*-критерию Стьюдента говорят об отсутствии отклонения кривых распределений от нормального на уровне $t_{0,05} < 1,97$.

Стандартизированный индекс равномерности *SEI* изменяется от 0,59 до 0,89, а индекс разнообразия *D* – от 0,81 до 0,90. Оба индекса не позволили четко разделить структурное *dbh*-разнообразие одно- и двухвозрастных древостоев ПП. Однако сравнение средних значений индексов Шеннона и Симпсона показало, что структурное разнообразие диаметра деревьев сложнее в двухвозрастных лесах. При этом оба индекса характеризуются корреляционной связью со стандартным отклонением ($r = 0,86$ и $r = 0,83$ соответственно с $p < 0,001$), а также обеспечили деление исследованных двухвозрастных древостоев на 2 типа UM1 ($0,78 < SEI < 0,86$; $0,87 < D < 0,89$) и UM4 ($0,70 < SEI < 0,80$; $0,81 < D < 0,86$).

Большое разнообразие диаметров (до 48 см и более) оказывает влияние на *GI* (находится в пределах 0,28–0,52), что свидетельствует о широком уровне структурного разнообразия. При анализе распределения деревьев по ступеням толщины для ПП замечено, что *GI* достигает более высоких значений (0,48–0,52), когда распределение диаметров близко к нисходящей (обратной J-образной) форме кривой (ПП 4, 5, 10 и 14). Нисходящий характер распределения диаметров отмечается для ПП в возрасте от 40 до 55 лет. Это согласуется с данными N. Løxerød и T. Eid [20] для смоделированных *dbh*-распределений смешанных хвойных древостоев, *GI* которых при варьировании от 0,16 до 0,30 свидетельствовали о нормальном распределении, а при диапазоне 0,44–0,57 – о нисходящем. Указанный характер распределения частично согласуется с данными G. Duduman et al. [9], которые для смешанных (хвойные с буком) насаждений Румынии установили следующие пределы: одновозрастные – $GI < 0,35$, двухвозрастные – $0,35 < GI < 0,43$, разновозрастные нерегулярные – $0,43 < GI < 0,51$ и разновозрастные сбалансированные – $GI > 0,51$.

Индекс формы Сийпилехто Ψ варьирует от 0,63 (ПП 4) до 1,05 (ПП 15). Большие значения индекса подтверждают унимодальность *dbh*-распределений исследованных древостоев, причем для ПП 15 – как пикообразное унимодальное.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции (над диагональю) и уровень значимости (под диагональю) индексов и статистик *dbh*-распределений для пробных площадей
The correlation coefficients (above the diagonal) and significance level (below the diagonal) of indices and statistics of *dbh*-distributions for the sample plots

	Ψ	<i>SEI</i>	<i>D</i>	<i>GI</i>	<i>Cv</i>	<i>As</i>	<i>Es</i>
Ψ	–	–0,184	–0,157	–0,584	–0,587	0,019	0,129
<i>SEI</i>	0,378	–	0,979	0,499	0,436	0,201	0,012
<i>D</i>	0,453	<0,001	–	0,474	0,404	0,158	–0,047
<i>GI</i>	0,002	0,011	0,017	–	0,991	0,542	0,404
<i>Cv</i>	0,002	0,029	0,045	<0,001	–	0,537	0,426
<i>As</i>	0,929	0,336	0,450	0,005	0,006	–	0,947
<i>Es</i>	0,539	0,956	0,822	0,045	0,034	<0,001	–

Примечание: Достоверные значения выделены полужирным шрифтом.

Оценка корреляций между различными индексами показывает (табл. 3), что индекс формы Ψ отрицательно коррелирует с *SEI*, *D*, *GI*, и *Cv*, причем для 2 последних связь умеренная и достоверная. Индекс *SEI* с *D* коррелируют сильно, а с *GI* и *Cv* слабо, но достоверно. Из всех рассматриваемых индексов *GI* имеет сильную достоверную корреляционную связь с *Cv*, а также умеренные – с коэффициентами *As* и *Es*. По мнению M. Pach и R. Podlaski [29], *GI* позволяет полностью и логически различать типы *dbh*-распределений. Однако в данном исследовании при ограниченном числе ПП индекс Джини не дал возможности четко дифференцировать одно- и двухвозрастные древостои. Поэтому следует согласиться с мнением [16, 19], что индекс *GI* может быть чувствителен к внутренним эколого-физиологическим характеристикам составляющих видов деревьев или к уникальной истории нарушений конкретного насаждения и необходимо дальнейшее изучение его изменчивости в разных типах леса.

Заключение

Полученные результаты по распределению по диаметрам на высоте груди как одно-, так и двухвозрастных смешанных древостоев липы мелколистной характеризуются широкой размерной изменчивостью деревьев. Распределения древостоев сильно варьируют по ПП, даже среди древостоев одного сукцессионного возраста. Несмотря на это, форма объединенных распределений по диаметру между древостоями различается слабо. Результаты исследования показывают, что кластерный анализ и применение индексов разнообразия позволяют лучше понять структуру строения древостоев липы. Поэтому индексы размерного разнообразия диаметров для насаждений липы мелколистной должны стать частью дальнейших оценок их надежности и использования в лесоводственной практике. Предложенный в настоящей работе подход к исследованию древостоев липы необходимо развивать, в т. ч. с использованием бимодальных, мультимодальных и неравномерных типов распределений диаметра в разновозрастных и старовозрастных древостоях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Габделхаков А.К., Ситдииков М.Р. Ход роста деревьев липы мелколистной в разновозрастном древостое // Вестн. БГАУ. 2013. № 3. С. 119–122.
Gabdelkhakov A.K., Sitdikov M.R. *Tilia cordata* Mill Growth Rate in an Uneven-Aged Stand. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik Bashkir State Agrarian University, 2013, no. 3, pp. 119–122. (In Russ.).
2. Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Блонская Л.Н., Фазлутдинов И.И. Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 21–36.
Gabdelkhakov A.K., Konovalov V.F., Rakhmatullin Z.Z., Blonskaya L.N., Fazlutdinov I.I. Biomass and Volume Estimation Models for Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 21–36. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-21-36>
3. Barbu C.-O., Duduman G., Tomescu C.V. Variation Patterns of Forest Structure Diversity after Set-Aside in Rarău-Giumalău Mountains, Romania. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 2, art. no. 251. <https://doi.org/10.3390/f14020251>
4. Bílek L., Remeš J., Švec O., Zahradník D. On the Way to Continuous Cover Forest at Middle Elevations – the Question of Forest Structure and Specific Site Characteristics. *Journal of Forest Science*, 2013, vol. 59, iss. 10, pp. 391–397. <https://doi.org/10.17221/57/2013-JFS>
5. Bourdier T., Cordonnier T., Kunstler G., Piedallu C., Lagarrigues G., Courbaud B. Tree Size Inequality Reduces Forest Productivity: An Analysis Combining Inventory Data for Ten European Species and a Light Competition Model. *PLoS One*, 2016, vol. 11(3), art. no. e0151852. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151852>
6. Burkhart H.E., Tomé M. Modeling Forest Trees and Stands. Springer Dordrecht, 2012. 458 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
7. Ciceu A., Pitar D., Badea O. Modeling the Diameter Distribution of Mixed Uneven-Aged Stands in the South Western Carpathians in Romania. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 7, art. no. 958. <https://doi.org/10.3390/f12070958>
8. Crow T.R., Buckley D.S., Nauertz E.A., Zasada J.C. Effects of Management on the Composition and Structure of Northern Hardwood Forests in Upper Michigan. *Forest Science*, 2002, vol. 48, iss. 1, pp. 129–145. <https://doi.org/10.1093/forestscience/48.1.129>
9. Duduman G. A Forest Management Planning Tool to Create Highly Diverse Uneven-Aged Stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2011, vol. 84, iss. 3, pp. 301–314. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr014>
10. Duduman G., Tomescu C., Drăgoi M., Palaghianu C. Variabilitatea dimensională a arborilor și diversitatea florei vasculare în amestecuri de rășinoase cu fag din rezervația Codrul secular Slătioara = Tree Size Variability and Plant Diversity in Mixed Coniferous-Beech Forests in Slătioara Forest Reserve. *Bucovina Forestieră*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 135–147. (In Rom.).
11. Fischer C., Mölder A. Trend to Increasing Structural Diversity in German Forests: Results from National Forest Inventories 2002 and 2012. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, art. no. 80. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0675-5>
12. Gabdelkhakov A., Rakhmatullin Z., Martynova M., Fazlutdinov I., Mullagaleev I. Evaluating Diameter Distribution Series of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) in Forest Stands. *Plant Methods*, 2021, vol. 17, art. no. 45. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00741-6>
13. Hakkenberg C.R., Song C., Peet R.K., White P.S. Forest Structure as a Predictor of Tree Species Diversity in the North Carolina Piedmont. *Journal of Vegetation Science*, 2016, vol. 27, iss. 6, pp. 1151–1163. <https://doi.org/10.1111/jvs.12451>
14. Hui G., Pommerening A. Analysing Tree Species and Size Diversity Patterns in Multi-Species Uneven-Aged Forests of Northern China. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 316, pp. 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.029>

15. Jaworski A., Kołodziej Z., Bartkowicz L. Structure and Dynamics of Stands of Primeval Character Composed of the Little-Leaf Linden (*Tilia cordata* Mill.) in the “Las lipowy 19. Obrozyska” Reserve (Southern Poland). *Journal of Forest Science*, 2005, vol. 51, iss. 7, pp. 283–304. <https://doi.org/10.17221/4565-JFS>
16. Johannes H.S., Sterba H. The Semi-Logarithmic Stem Number Distribution and the Gini-Index – Structural Diversity in “Balanced” DBH-Distributions. *Austrian Journal of Forest Science*, 2018, vol. 135, no. 1, pp. 19–31.
17. Kadavý J., Kneifl M., Fedorová B., Bartůněk J. Evaluation of Transformation from Even-Aged to Selection Forest by Means of Gini Index. *Journal of Forest Science*, 2017, vol. 63, iss. 10, pp. 476–484. <https://doi.org/10.17221/48/2017-jfs>
18. Kara F. Comparison of Tree Diameter Distributions in Managed and Unmanaged Kazdaği Fir Forests. *Silva Balcanica*, 2021, vol. 22(1), pp. 31–43. <https://doi.org/10.3897/silvabalkanica.22.e58020>
19. Keren S., Svoboda M., Janda P., Nagel T.A. Relationships between Structural Indices and Conventional Stand Attributes in an Old-Growth Forest in Southeast Europe. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 1, art. no. 4. <https://doi.org/10.3390/f11010004>
20. Lexerød N.L., Eid T. An Evaluation of Different Diameter Diversity Indices Based on Criteria Related to Forest Management Planning. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 222, iss. 1–3, pp. 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.046>
21. Liu F., Li F., Zhang L., Jin X. Modeling Diameter Distributions of Mixed-Species Forest Stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 7, pp. 653–663. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.960891>
22. Maltamo M., Kangas A., Uuttera J., Torniainen T., Saramäki J. Comparison of Percentile Based Prediction Methods and the Weibull Distribution in Describing the Diameter Distribution of Heterogeneous Scots Pine Stands. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 133, iss. 3, pp. 263–274. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(99\)00239-x](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00239-x)
23. McCarthy J.W., Weetman G. Stand Structure and Development of an Insect-Mediated Boreal Forest Landscape. *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 241, iss. 1–3, pp. 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.030>
24. McElhinny C., Gibbons P., Brack C., Bauhus J. Forest and Woodland Stand Structural Complexity: Its Definition and Measurement. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 218, iss. 1–3, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.034>
25. Merganič J., Šmelko Š. Quantification of Tree Species Diversity in Forest Stands – Model BIODIVERSS. *European Journal of Forest Research*, 2004, vol. 123, pp. 157–165. <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0032-8>
26. Motz K., Sterba H., Pommerening A. Sampling Measures of Tree Diversity. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 260, iss. 11, pp. 1985–1996. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.046>
27. Ozcelik R., Gül A.U., Merganic J., Merganicova K. Tree Species Diversity and its Relationship to Stand Parameters and Geomorphology Features in the Eastern Black Sea Region Forests of Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 291–298.
28. Ozdemir I., Norton D.A., Ozkan U.Y., Mert A., Senturk O. Estimation of Tree Size Diversity Using Object Oriented Texture Analysis and Aster Imagery. *Sensors*, 2008, vol. 8, no. 8, pp. 4709–4724. <https://doi.org/10.3390/s8084709>
29. Pach M., Podlaski R. Tree Diameter Structural Diversity in Central European Forests with *Abies alba* and *Fagus sylvatica*: Managed versus Unmanaged Forest Stands. *Ecological Research*, 2015, vol. 30, iss. 2, pp. 367–384. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1232-4>
30. Podlaski R., Sobala T., Kocurek M. Patterns of Tree Diameter Distributions in Managed and Unmanaged *Abies alba* Mill. and *Fagus sylvatica* L. Forest Patches. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 435, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.046>

31. Rouvinen S., Kuuluvainen T. Tree Diameter Distributions in Natural and Managed Old *Pinus sylvestris*-Dominated Forests. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 208, iss. 1–3, pp. 45–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.11.021>
32. San-Miguel-Ayanz J., Ståhl G., Vidal C., Cienciala E., Korhonen K. Criterion 1: Maintenance and Appropriate Enhancement of Forest Resources and their Contribution to Global Carbon Cycles. *FOREST EUROPE, UNECE, FAO 2011: State of Europe's Forests 2011: Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe*. Oslo, FOREST Europe Liaison Unit, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 2011, pp. 17–27.
33. Siipilehto J., Sarkkola S., Mehtätalo L. Comparing Regression Estimation Techniques when Predicting Diameter Distributions of Scots Pine on Drained Peatlands. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41, no. 2, art. no. 300. <https://doi.org/10.14214/sf.300>
34. Sohrabi V., Rahmani R., Jabbari S., Moayeri H. Evaluation Structural Diversity of *Carpinus betulus* Stand in Golestan Province, North of Iran. *Nusantara Bioscience*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 23–27. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n030104>
35. Sterba H. Diversity Indices Based on Angle Count Sampling and Their Interrelationships when Used in Forest Inventories. *Forestry*, 2008, vol. 81, iss. 5, pp. 587–597. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn010>
36. Valbuena R., Packalén P., Martí'n-Fernández S., Maltamo M. Diversity and Equitability Ordering Profiles Applied to Study Forest Structure. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 276, pp. 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.036>
37. Valdés G.E., Agramont A.R.E., Vazquez-Lozada S., Todd F.S. Forest Harvesting Impacts on the Structure and Composition of Coniferous Forests in Mexico. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 8, art. no. 1068. <https://doi.org/10.3390/f12081068>
38. Varga P., Chen H.Y.H., Klinka K. Tree-Size Diversity between Single- and Mixed-Species Stands in Three Forest Types in Western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 3, pp. 593–601. <https://doi.org/10.1139/x04-193>

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

Научная статья

УДК 630.231:630.221(571.1)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-58-70

Естественное лесовосстановление на вырубках в северо-таежном равнинном районе Западной Сибири

К.А. Башегуров¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9050-8902>

А.Н. Гавриленко¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3088-7020>

Е.П. Розинкина¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8000-9122>

А.С. Попов¹, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAN-6020-2021](https://orcid.org/0000-0002-3060-9461),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3060-9461>

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

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

И.В. Предеина², канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6806-8968>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; bashegurovka@m.usfeu.ru, lorba@mail.ru, rozinkinaep@mail.ru, sergeich@yandex.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru[✉]

²Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, ул. Дунина-Горкавича, д. 1, г. Ханты-Мансийск, Россия, 628007; PredeinaIV@admhmao.ru

Поступила в редакцию 02.08.23 / Одобрена после рецензирования 23.10.23 / Принята к печати 25.10.23

Аннотация. Проанализированы показатели накопления подроста на вырубках Западно-Сибирского северо-таежного равнинного лесного района. Учет подроста производился на площадках размером 2×2 м в количестве 30 площадок на каждой изучаемой вырубке. Отмечается, что лесовозобновление в районе исследования протекает довольно успешно. В условиях зеленомошно-ягодникового и багульникового-брусничного типов леса в составе подроста встречаются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), березы повислая (*Betula pendula* Roth.) и пушистая (*B. pubescens* Ehrh.), сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Rupr.), осина (*Populus tremula* L.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) с доминированием сосны обыкновенной и березы повислой. Высокая доля березы объясняется ежегодным семеношением вида и переносом семян ветром на большие расстояния, а также ее способностью к вегетативному возобновлению. Возобновление хвойных пород сдерживается периодичностью семенных лет, зависанием семян в лесной подстилке и слоевищах мхов. Эти проблемы можно решить минерализацией почвы. Минерализацию лучше сочетать с очисткой лесосек от порубочных остатков. Последние сгребаются бульдозером на трелевочный волок с 2 сторон. В результате перемешивания порубочных остатков с лесной подстилкой и почвой активизируются процессы деструкции древесины и минимизируется пожарная опасность на вырубке, создаются идеальные условия для накопления подроста. Основная площадь между трелевочными волоками (65–70 %) остается без минерализации, поскольку на этой части вырубки в процессе проведения лесосечных работ сохраняется максимальное количество подроста предварительной генерации. В условиях подзоны северной тайги Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, где средний прирост древесины составляет 0,6 м³/га, сырьевое значение древо-

стоек уступает место экологическому. Учитывая важную экологическую роль берез повислой и пушистой, целесообразно утвердить их в качестве главных древесных пород. Это позволит ускорить перевод вырубок в покрытые лесной растительностью земли и снизить неоправданно высокую долю площади лесокультурного фонда.

Ключевые слова: возобновление, вырубки, подрост, состав подроста, сосна обыкновенная, береза повислая, береза пушистая, густота подроста, встречаемость древесных пород, минерализация почвы, Западно-Сибирский северо-таежный равнинный лесной район

Для цитирования: Башегуров К.А., Гавриленко А.Н., Розинкина Е.П., Попов А.С., Залесов С.В., Предеина И.В. Естественное лесовосстановление на вырубках в северо-таежном равнинном районе Западной Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 58–70. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-58-70>

Original article

Natural Reforestation in the Felling Sites in the North Taiga Lowland Area of Western Siberia

Konstantin A. Bashegurov¹, Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9050-8902>

Andrey N. Gavrilenko¹, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3088-7020>

Ekaterina P. Rozinkina¹, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8000-9122>

Artem S. Popov¹, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAN-6020-2021](https://orcid.org/0000-0002-3060-9461),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3060-9461>

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

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

Irina V. Predeina², Candidate of Agriculture; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6806-8968>

¹Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirsky Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; bashegurovka@m.usfeu.ru, lorba@mail.ru, rozinkinaep@mail.ru, sergeich@yande.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru✉

²Department of Subsoil Use and Natural Resources of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, ul. Dunina-Gorkavicha, 1, Khanty-Mansiysk, 628007, Russian Federation; PredeinaIV@admhmao.ru

Received on August 2, 2023 / Approved after reviewing on October 23, 2023 / Accepted on October 25, 2023

Abstract. The indicators of undergrowth accumulation in the felling sites of the West Siberian north taiga lowland forest area have been analyzed. The undergrowth has been recorded on the plots measuring 2×2 m in the amount of 30 plots on each studied felling site. It is noted that reforestation in the study area is proceeding quite successfully. In the conditions of green moss-berry and wild rosemary-lingonberry forest types, the undergrowth includes Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver (*Betula pendula* Roth.) and downy (*B. pubescens* Ehrh.) birch, Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Rupr.), aspen (*Populus tremula* L.), Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) and Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) with the dominance of Scots pine and silver birch. The high proportion of birch is explained by the annual seed production of the species and the transfer of seeds by wind over long distances, as well as its ability to vegetatively renew. The regeneration of coniferous species is inhibited by the periodicity of seed years, the suspension of seeds in the forest litter and moss thalli. These problems can be solved by soil mineralization. It is better to combine mineralization with the clearing of felling

sites from felling residues. The latter are bulldozed onto a skidding trail from 2 sides. As a result of mixing the felling residues with the forest litter and soil, wood destruction processes are activated and the fire hazard at the felling site is minimized, and ideal conditions for the accumulation of undergrowth are created. The main area between the skidding trails (65–70 %) remains without mineralization, since in this part of the felling site, the maximum amount of pre-generation undergrowth is preserved during logging operations. In the conditions of the northern taiga subzone of the Khanty-Mansy Autonomous Okrug – Yugra, where the average wood increment is 0.6 m³/ha, the raw material value of the stands gives way to the ecological value. Considering the important ecological role of silver and downy birch, it is advisable to establish them as the main tree species. This will speed up the transfer of felling sites to forested lands and reduce an unreasonably high proportion of the forest culture fund area.

Keywords: regeneration, felling sites, undergrowth, undergrowth composition, Scots pine, silver birch, downy birch, undergrowth density, tree species occurrence, soil mineralization, West Siberian north taiga lowland forest area

For citation: Bashegurov K.A., Gavrilenko A.N., Rozinkina E.P., Popov A.S., Zalesov S.V., Predeina I.V. Natural Reforestation in the Felling Sites in the North Taiga Lowland Area of Western Siberia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 58–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-58-70>

Введение

Решение многих лесоводственных задач определяется успешностью лесовосстановления не покрытых лесной растительностью площадей. Они формируются чаще всего после сплошнолесосечных рубок и лесных пожаров. Исследования, выполненные в разных регионах страны, свидетельствуют, что под пологом спелых и перестойных насаждений есть значительное количество жизнеспособного хвойного подроста, который при условии его сохранения создает основу будущих молодняков на вырубках [2, 5, 6]. Однако при уничтожении в процессе лесосечных работ подроста предварительной генерации или его отсутствии по каким-то причинам на момент проведения рубок спелых и перестойных насаждений, вырубки на длительный период превращаются в пустыри с медленно накапливающимся подростом и высокой вероятностью смены пород [4, 12]. Большая продолжительность лесовосстановления на таких территориях обусловила введение И.С. Мелеховым специального раздела лесоведения – типологии вырубок [8].

В процессе лесосечных работ в различной степени изменяются физические, химические и другие свойства почвы [13, 14, 17, 18], что не может не сказаться на естественном лесовозобновлении вырубок и развитии подроста [11, 15, 16]. Нередко из-за уплотнения почвы и снижения испаряемости происходит заболачивание вырубок в таежной зоне [10], остепнение и закустаривание в южных районах [7].

К сожалению, нормативно-технические документы по ведению лесного хозяйства не только не способствуют ускорению лесовосстановления на вырубках хозяйственно-ценными породами, но и создают сложности. Так, в частности, в целом ряде лесных районов европейской части РФ действующими Правилами заготовки древесины, утвержденными приказом Минприроды России от 1.12.2020 г. № 993, разрешается проведение сплошнолесосечных рубок в спелых и перестойных насаждениях ели, пихты, сосны, лиственницы и мягколиственных пород с шириной лесосеки до 500 м и площадью до 50 га. При этом, согласно

пункту 44, если таксационный выдел не превышает 1,5 максимально допустимой площади, то он может назначаться в рубку полностью. Другими словами, разрешается увеличение площади сплошнолесосечной рубки до 75 га. При указанных размерах вырубок рассматривать вопрос о восстановлении их хвойными породами нецелесообразно. Особенно учитывая, что 2/3 всех семян выпадает на расстоянии 3 средних высот древостоя от стены леса [9].

Ориентация на искусственное лесовосстановление вырубок также не оправдана, по причине значительности площади ежегодно формирующихся вырубок. Кроме того, лесорастительные условия на столь больших открытых пространствах не соответствуют биологии многих древесных пород, а следовательно, рассчитывать на высокую сохранность искусственных насаждений нельзя. Даже проведение агротехнических уходов в течение 3 лет не сможет в полной мере решить задачу, поскольку лесные культуры в таежной зоне гибнут преимущественно не от заглушения живым напочвенным покровом, а от угнетения сопутствующими породами и от лесных пожаров.

Целью исследования стало изучение естественного лесовозобновления на вырубках Западно-Сибирского северо-таежного равнинного лесного района с разработкой предложений по ускорению этого процесса.

Объекты и методы исследования

Обследованы вырубки разных лет, расположенные в Западно-Сибирском северо-таежном равнинном лесном районе.

Исследования базируются на материалах пробных площадей (ПП), которые закладывались с учетом ранее применяемых апробированных методик [1, 3]. Для оценки количественных и качественных показателей подроста на каждой ПП через равные расстояния друг от друга закладывались учетные площадки. Их количество – по 30 шт. на каждой ПП, размер – 2×2 м.

На учетных площадках устанавливались основные таксационные показатели подроста: состав, густота, жизнеспособность, встречаемость, распределение по группам высот – в соответствии с «Правилами лесовосстановления...», утвержденными приказом Минприроды России от 29.12.2021 г. № 1024. После завершения работ по сбору и обработке данных о количественных и качественных характеристиках подроста производилось их сравнение с обозначенными в «Правилах лесовосстановления...» для определения степени обеспеченности подростом обследованных вырубок.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе выполнения полевых работ заложено 14 ПП на вырубках возрастом до 16 лет. Поскольку в условиях изучаемого лесного района заготовка древесины сплошнолесосечными рубками спелых и перестойных насаждений осуществляется преимущественно в сосновых насаждениях наиболее производительных типов леса – зеленомошно-ягодниковом и багульниково-брусничном, – на вырубках данных типов леса были заложены ПП. Материалы исследования свидетельствуют, что на всех вырубках присутствует мелкий, средний и крупный подрост (табл. 1). Последний в большинстве представлен экземплярами предварительной генерации, сохраненными в процессе проведения лесосечных

работ. В составе подроста встречаются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), березы повислая (*Betula pendula* Roth.) и пушистая (*B. pubescens* Ehrh.), сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Rupr.), осина (*Populus tremula* L.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.).

Особо следует отметить, что нежизнеспособный и сомнительный по качеству подрост зафиксирован только среди мелких и средних по высоте деревьев. Наличие подроста разного возраста и всех групп высот позволяет констатировать, что процесс лесовосстановления на вырубках продолжается.

Для получения более наглядной картины обеспеченности подростом обследованных вырубок произведен его перерасчет на крупный с использованием коэффициента 0,5 для мелкого, 0,8 – для среднего и 1,0 – для крупного.

Таблица 1

Характеристика подроста на вырубках в пересчете на крупный в Западно-Сибирском северо-таежном равнинном районе
The characteristics of undergrowth in the felling sites in terms of large in the West Siberian north taiga lowland area

ПП	Состав подроста	Порода	Количество подроста по состоянию, шт./га			Встречаемость, %	Количество жизнеспособного подроста, шт./га	Вырубка	
			Ж	См	Н/Ж			Год	Тип леса
1	6Б2С2Ос	Сосна	350	150	0	24	425	2014	
		Береза	1560	160	0	52	1640		
		Осина	410	0	0	24	410		
		<i>Итого</i>	2320	310	0	–	2475		
2	9С1БедОс	Сосна	2100	80	50	68	2140	2012	Зм.-яг.
		Береза	300	0	0	12	300		
		Осина	100	0	0	4	100		
		<i>Итого</i>	2500	80	50	–	2540		
3	5К5Е	Кедр	0	80	0	4	40	2018	
		Ель	0	80	0	4	40		
		<i>Итого</i>	0	160	0	–	80		
4	7С2Б1Ос едК	Сосна	1720	80	640	56	1760	2009	Бг.-бр.
		Береза	510	0	0	20	510		
		Кедр	80	0	0	4	80		
		Осина	150	0	0	8	150		
		<i>Итого</i>	2460	80	640	–	2500		
10	5Б3С1К1Е	Сосна	350	0	0	16	350	2019	Зм.-яг.
		Береза	600	0	0	12	600		
		Кедр	80	0	0	4	80		
		Ель	100	0	0	4	100		
		<i>Итого</i>	1130	0	0	–	1130		

Продолжение табл. 1

ПП	Состав подроста	Порода	Количество подроста по состоянию, шт./га			Встречаемость, %	Количество жизнеспособного подроста, шт./га	Вырубка	
			Ж	См	Н/Ж			Год	Тип леса
11	5Б2К2Е1С	Сосна	80	0	0	4	80	2019	Зм.-яг
		Береза	420	0	0	12	420		
		Кедр	180	0	0	8	180		
		Ель	180	0	0	8	180		
		<i>Итого</i>	860	0	0	–	860		
12	6С2Б1К1Е	Сосна	1960	0	0	40	1960	2008	
		Береза	500	0	0	8	500		
		Кедр	300	0	0	12	300		
		Ель	280	0	0	12	280		
		<i>Итого</i>	3040	0	0	–	3040		
12КГ	8С1Б1Ос	Сосна	2646	0	0	67	2646	2017*	
		Береза	375	0	0	17	375		
		Осина	167	0	0	8	167		
		<i>Итого</i>	3188	0	0	–	3188		
	10С	Сосна	496	0	1116	–	496	2017**	
13	5С3Б1К1Е	Сосна	1490	0	0	48	1490	2005	
		Береза	1000	0	0	32	1000		
		Кедр	180	0	0	4	180		
		Ель	180	0	0	8	180		
		<i>Итого</i>	2850	0	0	–	2850		
14	6Б4С+Е,Ос	Сосна	870	0	0	24	870	2012	
		Береза	1520	0	0	36	1520		
		Ель	80	0	0	4	80		
		Осина	80	0	0	4	80		
		<i>Итого</i>	2550	0	0	–	2550		
24	6Б4С	Сосна	856	0	0	42	856	2006	
		Береза	1385	0	0	38	1385		
		<i>Итого</i>	2240	0	0	–	2240		
25	6С3Б1Л+К	Сосна	1100	0	0	40	1100	2006	
		Береза	590	0	0	20	590		
		Кедр	100	0	0	4	100		
		Лиственница	150	0	0	8	150		
		<i>Итого</i>	1940	0	0	–	1940		

Окончание табл. 1

ПП	Состав подроста	Порода	Количество подроста по состоянию, шт./га			Встречаемость, %	Количество жизнеспособного подроста, шт./га	Вырубка	
			Ж	См	Н/Ж			Год	Тип леса
26	7БЗС+К,Е	Сосна	567	0	0	23	567	2007	Бг.-бр.
		Береза	1596	0	0	42	1596		
		Кедр	96	0	0	4	96		
		Ель	77	0	0	4	77		
		<i>Итого</i>	2337	0	0	–	2337		

Примечание: Ж – жизнеспособный; См – сомнительный; Н/Ж – нежизнеспособный; Зм.-яг. – зеленомошно-ягодниковый; Бг.-бр. – багульниково-брусничный. *Подрост между рядами лесных культур. **Посадка лесных культур сосны в 2018 г.

Только на 2 ПП встречаемость подроста сосны превышает 65 %, что характеризует эту группу возраста как равномерную. На остальных ПП, даже через 13 лет после рубки, подроста не более 48 %.

Для ускорения лесовосстановления на вырубках в районе исследования помимо сохранения жизнеспособного подроста можно рекомендовать минерализацию почвы.

Нами обследованы вырубки 4- и 5-летней давности типа леса сосняк зеленомошно-ягодниковый. Сразу после рубки они были очищены от порубочных остатков путем их сгребания бульдозером на трелевочные волокна с 2 сторон от них. При этом основная площадь между трелевочными волоками (65–70 %) оставалась без минерализации, поскольку на этой части вырубки сохраняется в процессе проведения лесосечных работ максимальное количество подроста предварительной генерации.

Таким образом, при площади минерализованной поверхности 30–35 % трелевочные волокна представляют собой валы высотой 1,5–2,0 м и шириной 3–4 м, в которых порубочные остатки и лесная подстилка перемешаны с почвой.

Поскольку деструкция древесины наиболее активно протекает при ее контакте с почвой, порубочные остатки и лесная подстилка в созданных бульдозером валах быстро разлагаются, что минимизирует потенциальную пожарную опасность и способствует формированию на бывших трелевочных волоках сначала всходов, а затем и подроста хвойных пород.

Из-за длительного периода отрицательных температур в условиях северной тайги на поверхности почвы формируется мощная лесная подстилка, в которой семена хвойных пород застревают, а при прорастании корни не в состоянии достать до минерального слоя почвы. Это является одним из сдерживающих факторов накопления подроста в указанной подзоне тайги. При предлагаемом способе минерализации вдоль каждого волокна создаются минерализованные полосы шириной 2,1–2,2 м (рис. 1). Поскольку на этих минерализованных полосах нет лесной подстилки, а также слоевищ мхов и лишайников, семена сосны и ели выпадают непосредственно на поверхность почвы.

Рис. 1. Внешний вид вырубок с минерализацией почвы, выполненной бульдозером

Fig. 1. The appearance of the felling sites with soil mineralization performed by a bulldozer



Использование бульдозера для минерализации почвы целесообразно при равнинном рельефе вырубki во избежание эрозии. Заготовку древесины лучше всего вести в зимний период с целью максимального сохранения подроста предварительной генерации. При ширине вырубок до 200 м в условиях подзоны северной тайги подрост предварительной генерации успешно возобновляется за счет семян от стены леса (табл. 2, 3).

Таблица 2

Густота и состав подроста на исследованных вырубках после минерализации
The density and composition of the undergrowth in the studied felling sites after mineralization

ПП/Давность минерализации, лет	Порода	Количество жизнеспособного подроста, тыс. шт./га				Встречаемость, %
		мелкого	среднего	итого	в пересчете на крупный	
1/5	Сосна	<u>25,8</u> 93,8	<u>1,7</u> 6,2	<u>27,5</u> 100	14,3	100
	Береза	<u>9,2</u> 80,0	<u>2,3</u> 20,0	<u>11,5</u> 100	6,5	80
	Лиственница	<u>0,7</u> 58,3	<u>0,5</u> 41,7	<u>1,2</u> 100	0,7	40
	<i>Итого</i>	<u>35,7</u> 88,8	<u>4,5</u> 11,2	<u>40,2</u> 100	21,5	
2/5	Сосна	<u>40,3</u> 94,6	<u>2,3</u> 5,4	<u>42,6</u> 100	21,9	93
	Береза	<u>3,3</u> 68,8	<u>1,5</u> 31,2	<u>4,8</u> 100	2,8	87
	Лиственница	<u>1,3</u> 46,4	<u>1,5</u> 53,6	<u>2,8</u> 100	1,8	60
	<i>Итого</i>	<u>44,9</u> 89,4	<u>5,3</u> 10,6	<u>50,2</u> 100	26,5	

Окончание табл. 2

ПП/Давность минерализации, лет	Порода	Количество жизнеспособного подроста, тыс. шт./га %				Встречаемость, %
		мелкого	среднего	итого	в пересчете на крупный	
3/4	Сосна	$\frac{31,5}{96,3}$	$\frac{1,2}{3,7}$	$\frac{32,7}{100}$	16,7	100
	Береза	$\frac{3,7}{52,9}$	$\frac{3,3}{47,1}$	$\frac{7,0}{100}$	4,5	93
	<i>Итого</i>	$\frac{35,2}{88,7}$	$\frac{4,5}{11,3}$	$\frac{39,7}{100}$	21,2	
4/4	Сосна	$\frac{20,3}{93,1}$	$\frac{1,5}{6,9}$	$\frac{21,8}{100}$	11,4	100
	Береза	$\frac{2,7}{69,2}$	$\frac{1,2}{30,8}$	$\frac{3,9}{100}$	2,3	60
	Лиственница	$\frac{0,2}{100}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,2}{100}$	0,1	7
	<i>Итого</i>	$\frac{23,2}{89,6}$	$\frac{2,7}{10,4}$	$\frac{25,9}{100}$	13,8	

Таблица 3

Общий состав подроста на исследованных вырубках после минерализации
The general composition of the undergrowth in the studied felling sites after mineralization

ПП/Давность минерализации, лет	Состав подроста	
	всего	в пересчете на крупный
1/5	6,8С2,9Б0,3Лц	6,7С3,0Б0,3Лц
2/5	8,5С1,0Б0,5Лц	8,3С1,1Б0,6Лц
3/4	8,2С1,8Б	7,9С2,1Б
4/4	8,4С1,5Б0,1Лц	8,9С1,7Б0,1Лц

Приведенные в табл. 2, 3 данные свидетельствуют, что уже спустя 4–5 лет после работ по минерализации почвы густота подроста варьирует от 25,9 до 50,2 тыс. шт./га. В составе подроста абсолютно доминирует сосна обыкновенная, на долю которой приходится от 68 до 85 % от его общего количества. Короткий период после проведения минерализации объясняет преобладание в числе подроста мелких экземпляров высотой до 0,5 м. Доля среднего подроста не превышает 11,3 %, а крупный подрост отсутствует. Через 4 года после минерализации средняя высота мелкого подроста составляет $28,0 \pm 0,3$ см, а среднего – $76,0 \pm 1,5$ см. Средняя высота мелкого подроста на рубках, где минерализация почвы была проведена 5 лет назад, – $34,0 \pm 0,5$ см, а среднего – $101,0 \pm 3,7$ см.

Помимо сосны обыкновенной в составе подроста присутствует лиственница сибирская и береза. Последняя представлена преимущественно экземплярами березы повислой.

Особо следует отметить, что подрост сосны обыкновенной на минерализованных участках характеризуется высокой встречаемостью и может быть оценен как равномерный (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид участка минерализации: *a* – ПП 1; *б* – ПП 2

Fig. 2. The appearance of the mineralization site: *a* – SP 1; *б* – SP 2

Наличие подроста предварительной генерации на пасаках, а также подроста сосны, лиственницы и березы на минерализованных участках, включая трелевочные волокна, позволяет надеяться на формирование в будущем на обследованных вырубках высокопроизводительных устойчивых насаждений.

В «Правилах лесовосстановления...» для района исследования установлены следующие требования к подросту для перевода вырубки в покрытые лесной растительностью земли: возраст – 8 лет, густота – 2,0 тыс. шт./га и средняя высота – 1,2 м и более. На изученных нами вырубках возраст подроста составляет 4 и 5 лет. При этом густота подроста сосны в пересчете на крупный, т. е. превышающий по значению нормативный показатель, составляет на вырубках, где минерализация была произведена 4 года назад, – 11,4 и 16,7 тыс. шт./га, а на вырубке с выполнением минерализации почвы 5 лет назад – 14,3 и 21,9 тыс. шт./га. При этом на всех ПП обнаружен жизнеспособный подрост.

Логично предположить, что через 3–4 года, когда подрост сосны достигнет нормативного показателя, будет возможность перевода вырубки в покрытые лесной растительностью земли по возрасту и его количеству без проведения дополнительных мероприятий по лесовосстановлению.

Проектируя работы по лесовосстановлению, нельзя не учитывать целевое назначение лесов. В условиях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры с его жесткими лесорастительными условиями средний ежегодный прирост древесины на 1 га покрытой лесной растительностью площади не превышает 0,6 м³. Столь незначительный прирост древесины свидетельствует, что в данном регионе при ведении лесного хозяйства предпочтение следует отдать не сырьевым, а экологическим функциям лесов. Другими словами, главными задачами лесоводов в округе должны стать сокращение не покрытых лесной растительностью площадей и формирование насаждений, в максимальной степени выполняющих защитные функции.

В условиях меняющегося климата особую важность приобретают данные о депонировании древостоями углерода из атмосферного воздуха. Выполненное исследование показало, что на вырубках успешно протекает возобновление березы, которая нередко доминирует в составе подроста в пересчете на

крупный. Береза по своей экологической значимости в данном регионе не уступает сосне и ели. В частности, согласно «Методическим указаниям по количественному определению объема поглощения парниковых газов», утвержденным распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 г. № 20-р, содержание задепонированного углерода в единице объема древесины у березы выше, чем у сосны и ели. Следовательно, даже при одинаковых запасах древесины березняки в большей степени оказывают влияние на состав атмосферного воздуха, чем сосняки и ельники. Кроме того, обладая более быстрым ростом, береза формирует к 45–50 годам запас, близкий к показателю сосняков и ельников 100-летнего возраста. Иначе говоря, в березняках можно выполнить 1,5–2,0 оборота рубки за период 1 оборота в хвойных насаждениях.

Береза в подзоне северной тайги практически ежегодно дает семена, которые разносятся ветром на большие расстояния. У сосны и ели, напротив, семенные годы повторяются редко, а разлет семян ограничен, что сдерживает лесовосстановление на вырубках при отсутствии подроста предварительной генерации.

Нельзя не учитывать и тот факт, что береза хорошо возобновляется порослью от пня. В то же время березы повислая и пушистая не относятся к числу главных пород, и даже при условии значительного количества подростка этих видов на вырубке ее нельзя перевести в покрытые лесной растительностью земли до проведения лесоустройства. В результате накапливаются площади лесокультурного фонда, а при создании лесных культур речь идет не о формировании таковых, а по сути, о реконструкции березовых насаждений.

Назрела острая необходимость в установлении берез повислой и пушистой в качестве главных пород при ведении лесного хозяйства в Западно-Сибирском северо-таежном равнинном лесном районе.

Выводы

1. На вырубках Западно-Сибирского северо-таежного равнинного района формируются молодняки с доминированием в составе березы разных видов и сосны обыкновенной. В примеси к указанным породам встречаются сосна кедровая сибирская, ель сибирская, лиственница сибирская и осина.

2. Из-за периодичности семенных лет у хвойных пород и зависания их семян в лесной подстилке процесс накопления хвойного подростка затягивается, что способствует увеличению лесокультурного фонда.

3. Обеспечить успешное лесовосстановление вырубок в зеленомошно-ягодниковом типе леса можно проведением бульдозером минерализации на 30–35 % площади вырубки вдоль трелевочных волоков.

4. Учитывая доминирование экологических функций насаждений над сырьевыми в исследованном лесном районе, целесообразно отнести березы повислую и пушистую к главным породам, что обеспечит сокращение искусственно завышенных площадей лесокультурного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бунькова Н.П., Залесов С.В., Залесова Е.С., Магасумова А.Г., Осипенко Р.А. Основы фитомониторинга. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2020. 90 с.
Bun'kova N.P., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., Osipenko R.A. *Fundamentals of Phytomonitoring*. Yekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2020. 90 p. (In Russ.).

2. Ведерников Е.А., Залесов С.В., Залесова Е.С., Магасумова А.Г., Толкач О.В. Обеспеченность подростом спелых и перестойных темнохвойных насаждений Пермского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 32–42.

Vedernikov E.A., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., Tolkach O.V. Provision with Undergrowth of Mature and Overripe Dark Coniferous Stands in Perm Krai. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 3, pp. 32–42. (In Russ.). <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.32>

3. Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 152 с.

Dancheva A.V., Zalesov S.V. Environmental Monitoring of Forest Plantations for Recreational Purposes. Yekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2015. 152 p. (In Russ.).

4. Залесов С.В. Лесоводство. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2020. 295 с. Zalesov S.V. Forestry. Yekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2020. 295 p. (In Russ.).

5. Залесова Е.С., Белов Л.А., Залесов С.В., Тимербулатов Ф.Т., Чермных А.И. Влияние типа леса и полноты древостоев на обеспеченность подростом спелых и перестойных сосняков подзоны северной тайги // Междунар. науч.-исследоват. журн. 2019. № 11(89). Ч. 2. С. 37–41.

Zalesova E.S., Belov L.A., Zalesov S.V., Timerbulatov F.T., Chermnykh A.I. Influence of Forest Type and Normality on Security of Matter of Ripe and Perennial Pine Woods of North Taiga Subzone. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* = International Research Journal, 2019, no. 11(89), part 2, pp. 37–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.89.11.040>

6. Залесова Е.С., Залесов С.В., Терехов Г.Г., Толкач О.В., Луганский Н.А., Шубин Д.А. Обеспеченность спелых и перестойных светлохвойных насаждений Западно-Уральского таежного лесного района подростом предварительной генерации // Успехи современ. естествознания. 2019. № 1. С. 39–44.

Zalesova E.S., Zalesov S.V., Terekhov G.G., Tolkach O.V., Luganskiy N.A., Shubin D.A. Self-Sufficiency of Mature and Overmature Softwood Forests of West Ural Taiga Region in Undergrowth of Pre-Generation. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2019, no. 1, pp. 39–44. (In Russ.).

7. Калачев А.А., Архангельская Т.А., Залесов С.В. Лесоводственная эффективность сплошнолесосечных рубок в пихтовых лесах Рудного Алтая // Аграрн. вестн. Урала. 2014. № 4(122). С. 60–63.

Kalachev A.A., Arkhangel'skaya T.A., Zalesov S.V. Silvicultural Efficiency of Clear-Cutting in Fir Forests of Rudny Altai. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2014, no. 4(122), pp. 60–63. (In Russ.).

8. Мелехов И.С. Лесоводство. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. 324 с.

Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2005. 324 p. (In Russ.).

9. Санников С.Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. М.: Наука, 1992. 264 с.

Sannikov S.N. Ecology and Geography of Natural Regeneration of Scots Pine. Moscow, Nauka Publ., 1992. 264 p. (In Russ.).

10. Цветков В.Ф. Вопросы лесовозобновления в связи с рубками на Европейской севере России // Некоторые вопросы лесоведения и лесоводства на Европейском севере России. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2005. С. 29–76.

Tsvetkov V.F. Reforestation Issues in Connection with Logging in the European North of Russia. *Some Issues of Forestry and Silviculture in the European North of Russia*. Arkhangel'sk, Arkhangel'sk State Technical University Publ., 2005, pp. 29–76. (In Russ.).

11. Akay A.E., Yuksel A., Reis M., Tutus A. The Impacts of Ground-Based Logging Equipment on Forest Soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, vol. 16, no. 3, pp. 371–376.
12. Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Potapov P.V., Turubanova S.A., Yaroshenko A.Yu. *Russia's Forests. Dominating Forest Types and Their Canopy Density*. Scale 1: 14,000,000. Moscow, 2004.
13. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
14. Marchi E., Picchio R., Mederski P.S., Vusić D., Perugini M., Venanzi R. Impact of Silvicultural Treatment and Forest Operation on Soil and Regeneration in Mediterranean Turkey Oak (*Quercus cerris* L.) Coppice with Standards. *Ecological Engineering*, 2016, vol. 95, pp. 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.084>
15. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland, Springer International Publishing, 2013. 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
16. Šušnjar M., Horvat D., Šešelj L. *Soil Compaction in Timber Skidding in Winter Conditions*. Croatian Journal of Forest Engineering, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 3–15.
17. Zenner E.K., Fauskee J.T., Berger A.L., Puettmann K.J. Impacts of Skidding Traffic Intensity on Soil Disturbance, Soil Recovery, and Aspen Regeneration in North Central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2007, vol. 24, iss. 3, pp. 177–183. <https://doi.org/10.1093/njaf/24.3.177>
18. Zetterberg T., Olsson B.A., Löfgren S., Brömssen von C., Brandtberg P.-O. The Effect of Harvest Intensity on Long-Term Calcium Dynamics in Soil and Soil Solution at Three Coniferous Sites in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 302, pp. 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.030>

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

Научная статья

УДК 630*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-71-82

Лесоводственная оценка комплексных рубок в лесах Вологодской области

С.А. Корчагов[✉], *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [HLQ-4954-2023](https://orcid.org/0000-0001-5492-9550),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>

Е.А. Сурина, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID*: [AAD-6192-2019](https://orcid.org/0000-0002-8159-8977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-8977>

О.А. Коношатов, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID*: [JEZ-9194-2023](https://orcid.org/0009-0007-9819-4219),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9819-4219>

Н.С. Минин, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID*: [AHD-5236-2022](https://orcid.org/0000-0002-2926-1146),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2926-1146>

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


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

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; korchagov@sevniilh-arh.ru[✉], surina_ea@sevniilh-arh.ru, n.minin@sevniilh-arh.ru, okarkhangel@yandex.ru, lesovod@sevniilh-arh.ru

Поступила в редакцию 03.07.23 / Одобрена после рецензирования 29.09.23 / Принята к печати 01.10.23

Аннотация. В лесном фонде Вологодской области широко представлены вторичные и производные лиственно-хвойные леса. Поиск эффективных методов ведения хозяйства в них с целью повышения запаса и ускорения выращивания ценной хвойной древесины является актуальной задачей. В качестве варианта ее решения может рассматриваться своевременное и научно обоснованное проведение комплексных рубок. Комплексные рубки осуществляются в разновозрастных и сложных древостоях и должны сочетать заготовку спелой древесины и уход за лесом. Основные цели таких рубок – переформирование лиственно-хвойных насаждений в хвойно-лиственные, улучшение роста и состояния хвойного яруса, повышение продуктивности древостоев. Комплексные рубки не рассматриваются в действующем российском законодательстве, что связано с отсутствием достаточного научного обоснования и нормативного обеспечения для их проведения. Посредством обобщения производственного опыта, результатов выполненных авторами исследований и данных многолетних наблюдений, осуществляемых сотрудниками Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства на стационарных опытных объектах с комплексными рубками, сформулированы предложения по проектированию и назначению таких рубок, установлены организационно-технические параметры для их эффективного проведения во вторичных и производных лесах Вологодской области. Отмечается, что путем своевременной и правильной вырубki лиственных видов и ухода за хвойным подростом возможно преобразовать лиственно-хвойные насаждения в хвойные, добиться улучшения роста и состояния хвойного яруса, производительности древостоя. Кроме того, комплексные рубки должны способствовать улучшению средообразующей роли леса, повышению экологических и специальных свойств лесных экосистем, а также сохранению биологического разнообразия. Планирование и назначение комплексных рубок следует выполнять с учетом лесообразующих факторов, технологических, технических возможностей и экономических

© Корчагов С.А., Сурина Е.А., Коношатов О.А., Минин Н.С., Гоголева Л.Г., 2025

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

показателей. Правильный, научно обоснованный подход к проведению комплексных рубок позволит повысить их лесоводственную и экономическую эффективность.

Ключевые слова: лиственно-хвойные леса, вторичные леса, производные леса, комплексные рубки, насаждение, подрост, ель, производительность

Для цитирования: Корчагов С.А., Сурина Е.А., Конюшатов О.А., Минин Н.С., Гоголева Л.Г. Лесоводственная оценка комплексных рубок в лесах Вологодской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 71–82. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-71-82>

Original article

Silvicultural Assessment of Complex Logging in the Forests of the Vologda Region

Sergey A. Korchagov[✉], Doctor of Agriculture; ResearcherID: [HLQ-4954-2023](https://orcid.org/0000-0001-5492-9550),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>

Elena A. Surina, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAD-6192-2019](https://orcid.org/0000-0002-8159-8977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-8977>

Oleg A. Konyushatov, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [JEZ-9194-2023](https://orcid.org/0009-0007-9819-4219),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9819-4219>

Nikolay S. Minin, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AHD-5236-2022](https://orcid.org/0000-0002-2926-1146),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2926-1146>

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

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

Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; korchagov@sevniilh-arh.ru[✉], surina_ea@sevniilh-arh.ru, n.minin@sevniilh-arh.ru, okarkhangel@yandex.ru, lesovod@sevniilh-arh.ru

Received on July 3, 2023 / Approved after reviewing on September 29, 2023 / Accepted on October 1, 2023

Abstract. The forest fund of the Vologda Region is widely represented by secondary and derivative deciduous-coniferous forests. The search for effective methods of managing them in order to increase the stock and accelerate the cultivation of valuable coniferous wood is an urgent task. The timely and scientifically based implementation of complex logging can be considered as an option for its solution. Complex logging is carried out in uneven-aged and complex stands and should combine harvesting of mature wood and forest maintenance. The main goals of such logging are the transformation of deciduous-coniferous plantations into coniferous-deciduous, improving the growth and condition of the coniferous layer and increasing the productivity of stands. Complex logging is not considered in the current Russian legislation, which is due to the lack of sufficient scientific justification and regulatory support for their implementation. By means of the generalization of production experience, the results of the research carried out by the authors and data from long-term observations carried out by employees of the Northern Research Institute of Forestry at stationary experimental facilities with complex logging, proposals have been formulated for the design and purpose of such logging, and organizational and technical parameters have been established for their effective implementation in secondary and derivative forests of the Vologda Region. It is noted that by timely and proper cutting of deciduous species and care for coniferous undergrowth, it is possible to transform deciduous-coniferous plantations into coniferous ones, improve



the growth and condition of the coniferous layer, and increase the productivity of the stand. In addition, complex logging should contribute to improving the environmental role of forests, increasing the ecological and special properties of forest ecosystems, as well as preserving biological diversity. The planning and assignment of complex logging should be carried out taking into account forest-forming factors, technological and technical capabilities, as well as economic indicators. A correct, scientifically based approach to complex logging will improve their forestry and economic efficiency.

Keywords: deciduous-coniferous forests, secondary forests, derivative forests, complex logging, plantation, undergrowth, spruce, productivity

For citation: Korchagov S.A., Surina E.A., Konyushatov O.A., Minin N.S., Gogoleva L.G. Silvicultural Assessment of Complex Logging in the Forests of the Vologda Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1, pp. 71–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-71-82>

Введение

Сглаживание последствий деградации количественной и качественной структуры лесного фонда в таежной зоне является актуальной задачей. Ее решение может базироваться на своевременном и обоснованном проведении рубок различных видов. На выбор вида рубок оказывают влияние лесорастительные условия [19–24], возрастная структура насаждений, методы лесовосстановления [15, 17] и другие факторы [6].

В соответствии с ОСТ 56-108–98 «Лесоводство. Термины и определения» под комплексной рубкой понимают «рубку в разновозрастных и сложных древостоях, сочетающую выполнение элементов по заготовке спелой, перестойной древесины и рубок ухода, выполняемых одновременно на одном и том же участке леса». Основными задачами комплексных рубок являются переформирование лиственно-хвойных насаждений в хвойно-лиственные, улучшение роста и состояния хвойного яруса, повышение продуктивности древостоев. При таких рубках достигшие возраста спелости лиственные породы вырубаются в 1–2 приема, а хвойные сохраняются в максимальном количестве.

Широкое научное обсуждение комплексных рубок и их опытно-производственная апробация приходятся на 60-е гг. XX в. В это время И.С. Мелеховым впервые вводится понятие «комплексная рубка». По его утверждению, комплексные рубки могут быть направлены в сторону лучшего использования защитных свойств леса, повышения его экологической роли, применяться при рубках ландшафтного, рекреационного назначения и др. Комплексные рубки отличаются большой пластичностью, возможностью охвата различных объектов – от промышленного акцента до рубок защитно-экологического назначения [10]. Исследования лесоводственной эффективности комплексных рубок, начатые И.С. Мелеховым [10, 11], не потеряли актуальность [2, 4, 5].

В качестве комплексной рубки Л.А. Кайрюкштис проводил 6-приемную рубку в 2 цикла для 2-ярусных лиственно-еловых древостоев на дренированных почвах без подроста [7, 8]. Одной из разновидностей комплексных рубок в части технологии ее выполнения можно считать чересполосно-пасечную рубку в 2-ярусных елово-лиственных древостоях, предложенную П.В. Алексеевым [1]. В качестве комплексных рубок также рассматривают проходную рубку Д.М. Кравчинского [13].

По правилам ведения лесного хозяйства в Финляндии [14] комплексные рубки применяют, когда древостои неоднородны по высоте и деревья разных ярусов по состоянию крон являются благонадежными или способными восстановить нормальный рост; а также на загущенных участках в насаждениях с преобладанием ели. Рубка в лесу с разнообразными возрастной, пространственной и товарной структурами (сложные древостои) имеет 2 задачи: возобновление некоторых компонентов древостоя и сохранение благонадежного насаждения. Такой способ используют в защитных лесах (в Лапландии) и в зоне с суммой средних суточных температур воздуха за вегетационный период ниже 750 °С. При комплексной рубке сохраняют на доразращивание перспективный древостой: от подростка до деревьев пиловочных размеров. Перегущенные группы деревьев разреживают с осуществлением уборки старого верхнего полога, высвобождая пространство для жизнеспособных экземпляров.

Комплексные рубки не рассматриваются в действующем лесном законодательстве РФ, что связано с отсутствием достаточного научного обоснования и нормативного обеспечения для их проведения.

Цель исследования – оценка лесоводственной эффективности проведения комплексных рубок для разработки предложений по их проектированию и назначению во вторичных и производных лесах Вологодской области.

Объекты и методы исследования

Исследование выполнено на заложенных сотрудниками Архангельского института леса и лесохимии (сегодня Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства) в разных по составу и структуре насаждениях Вологодской области стационарных опытных объектах «Чекшино», «Норобово», «За Пельшмой» с проведенными комплексными рубками.

Стационар «Чекшино» общей площадью 1,0 га заложен В.Ф. Кротом в 1979–1980 гг. на территории Сокольского лесничества в Двиницком участковом лесничестве. Он представлен 4 опытными вариантами и контролем. Это высокополнотное березовое насаждение (с единичным участием осины и ивы) пирогенного происхождения. В опытных вариантах в зимний период проведена заготовка всей лиственной древесины, в летний период – доочистка мест рубок и разреживание подростка селективным методом с сохранением ели европейской в количестве 1,5; 3,0; 4,5 и 6,0 тыс. шт./га (варианты I, II, III и IV соответственно).

Стационар «За Пельшмой» общей площадью 1,5 га заложен в 2003 г. в Кадниковском сельском участковом лесничестве Сокольского лесничества, ТОО «Русь». Стационарный объект представлен 4 опытными вариантами комплексных рубок на участке, ранее неоднократно пройденном пожаром, где произрастал древостой естественного семенного происхождения с разновозрастной структурой. Древостой перед рубкой характеризовался III классом бонитета и высокой производительностью. В опытных вариантах осуществлена выборка деревьев (по числу стволов / запасы) 11/35, 11/25, 20/36 и 19/40 % (варианты I, II, III и IV соответственно), а также уход за подростом ели европейской (прочистки и прореживания).

Стационар «Норобово» расположен на территории Вологодского лесничества, Вологодского участкового лесничества. Комплексная рубка (сплошная выруб-

ка спелой и перестойной древесины и прореживание елового подроста) проведена в 1996 г. на площади 0,2 га. До рубки на участке произрастал спелый, высокополнотный березовый древостой I класса бонитета с единичным участием осины и ели.

Лесоучетные работы на стационарных объектах и расчет лесоводственно-таксационных показателей насаждений, а также статистический анализ данных выполнены в соответствии с общепринятыми методиками [3, 9, 12, 16, 18].

Многолетние наблюдения на объектах позволили проследить динамику роста и развития оставленной на доразращивание европейской ели после проведения комплексных рубок, а также сформулировать научно обоснованные предложения по проектированию и назначению таких рубок в производных и вторичных лесах Вологодской области.

Результаты исследования и их обсуждение

Лесоучетные работы на стационарном объекте «Чекшино» проведены через 43 года после комплексной рубки (табл. 1). В результате комплексных рубок сформировался высокополнотный еловый древостой, характеризующийся значительной производительностью (292–365 м³/га). Запас елового элемента в опытных вариантах в 4,6–5,8 раза выше, чем на контрольном участке.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационная характеристика насаждений в опытных вариантах с комплексными рубками, объект «Чекшино»
The silvicultural and inventory characteristics of the plantations in experimental versions with complex logging, the Chekshino facility

Вариант	Состав	Возраст, лет	Диаметр, см	Высота, м	Густота, шт./га		Полнота		Бонитет	Запас, м ³ /га
					ствол	подрост	абсолютная, м ² /га	относительная		
I	10Е	78	20,0	18,3	1355	–	42,5	1,37	III	365
II	10Е	78	17,5	17,1	1595	–	36,6	1,22	III	292
III	10Е+Ос	78	16,9	15,5	2180	–	44,5	1,57	IV	358
IV	10Е	78	15,8	15,5	2582	–	43,9	1,55	IV	351
V (контроль)	9Б	88	22,8	22,5	533	–	27,9	0,78	III	215
	1Ос	88	34,5	25,0	33	–	3,0	0,09		36
	10Е (II ярус)	78	12,8	10,0	939	480	11,7	0,53	–	63

В результате вырубки лиственных пород начался активный рост у части экземпляров подпологовой ели. В течение 1-го года после рубки стремительное развитие подроста при его средней высоте 1,5–2,0 м отмечено у 10–20 % деревьев. В среднем за первые 10 лет после рубки наиболее активным ростом в высоту отличались варианты I и II. Однако различия между выборочными средними доказаны лишь для вариантов I–III, IV и II–III ($t_{\text{факт.}} > t_{0,95}$).

По мере увеличения давности рубки наметилось повышение темпов роста ели во всех опытных вариантах. Через 15 лет после рубки 50–60 % ели адаптировалось к новым условиям среды, что сказалось на активности роста этих деревьев. Особенно это проявилось в варианте I при наименьшем количестве сохраняемой на доращивание ели (1,5 тыс. шт./га). Кроме того, в этом варианте произошло существенное увеличение количества елового подроста за счет перехода самосева в эту категорию. Если не принимать в расчет период адаптации, то развитие подпологовой ели в 15-летний период протекало по I классу бонитета. В возрасте 45 лет при высоте 5–6 м формируемые ельники соответствовали V классу бонитета, в возрасте 78 лет – III–IV. Бонитет III отмечен в ельниках с наименьшей густотой (варианты I и II).

В варианте I ель отличалась более интенсивным ростом по высоте в сравнении с другими опытными вариантами, превышение по средней высоте на 10-й год после рубки составило 12,1–20,1 %. Наименьшими темпами роста по высоте характеризовалась ель в варианте III. В возрасте 62 (27-й год после рубки) и 78 лет (43-й) по темпу роста в высоту превосходила ель I и II вариантов.

В 78-летнем возрасте ели наибольшим диаметром на высоте груди характеризовалась ель в варианте I: превышение среднего диаметра по отношению к вариантам II, III и IV составило 1,1; 1,2 и 1,3 раза соответственно. Наибольший запас древесины также отмечен в варианте I (365 м³/га), затем в порядке убывания показателя следуют варианты III (358 м³/га), IV (351 м³/га) и II (292 м³/га).

Исследование на стационарном объекте «Норобово» проведено через 27 лет после комплексной рубки (табл. 2). В листовенно-хвойных лесах удалось сформировать простое хвойное насаждение с преобладанием ели, запас которой составляет 94 % от общего запаса древесины.

Таблица 2

Лесоводственно-таксационная характеристика лесных насаждений в опытном варианте с комплексными рубками, объект «Норобово»
The silvicultural and inventory characteristics of the plantations in experimental versions with complex logging, the Norobovo facility

Состав	Возраст, лет	Диаметр, см	Высота, м	Густота, шт./га		Полнота		Бонитет	Запас, м ³ /га
				ствол	подрост	абсолютная, м ² /га	относительная		
9Е	77	23,6	19,0	560	400	22,1	0,65	III	207
1Б	–	19,4	20,0	48	–	1,4	0,05	–	11
Ед. Ос	–	10,5	17,3	20	–	0,2	0,01	–	2
<i>Итого</i>				628	400	23,7	0,71	III	220

*Здесь и в табл. 3 для бонитета приведено среднее значение.

Средний диаметр ели за 27-летний период увеличился в 2,3 раза, высота – в 2,0 раза. Запас стволовой еловой древесины вырос в 3,6 раза, что является весьма значительным показателем. Проведение опытной комплексной рубки на объекте следует считать целесообразным с лесоводственной точки зрения.

Посредством комплексных рубок на стационарном объекте «За Пельшмой» также сформированы насаждения с преобладанием хвойных пород в составе древостоя во всех опытных вариантах (табл. 3).

Таблица 3

**Лесоводственно-таксационная характеристика лесных насаждений
в опытных вариантах с комплексными рубками, объект «За Пельшмой»**
**The silvicultural and inventory characteristics of the plantations
in experimental versions with complex logging, the Za Pel'shmoy facility**

Вариант	Ярус	Состав	Возраст, лет	Диаметр, см	Высота, м	Густота, шт./га		Полнота		Бонитет	Запас, м ³ /га
						ствол	под-рост	абсолютная, м ² /га	относительная		
I	I	6ЕЗБ 1Ос+С	100	19,0	17,7	470	2820	12,52	0,40	IV	126
			95	23,3	22,2	162	–	6,40	0,23	–	72
			83	32,4	25,1	24	–	1,60	0,04	–	15
			100	28,3	23,3	14	–	0,88	0,02	–	8
<i>Итого</i>						670	2820	21,40	0,69	IV	221
II	I	7Е2Б 1С+Ос	105	19,4	19,0	293	2420	8,04	0,25	IV	74
			93	19,2	20,3	84	–	2,27	0,09	–	24
			105	30,1	24,8	13	–	0,93	0,02	–	10
			83	27,6	23,2	7	–	0,39	0,01	–	5
<i>Итого</i>						397	2420	11,63	0,37	IV	113
III	I	8Е1Б 1С+Ос	108	20,2	17,5	501	2634	14,70	0,45	IV	133
			93	20,6	19,0	105	–	2,86	0,11	–	25
			103	27,3	28,0	18	–	1,06	0,02	–	11
			83	42,5	25,2	2	–	0,28	0,01	–	4
<i>Итого</i>						626	2634	18,9	0,59	IV	173
IV	I	5С4Б 1Ос	113	19,7	22,2	84	–	5,29	0,14	III	57
			98	19,7	18,8	193	–	5,31	0,22	–	48
			83	31,1	25,2	11	–	0,83	0,02	–	8
	II	10Е	105	18,3	14,5	358	1748	8,34	0,30	–	62
<i>Итого</i>						646	1748	19,77	0,68	III	175

Наилучшим образом целям проведения комплексных рубок отвечает вариант III, где доля еловой древесины в настоящее время достигает 77 % по запасу.

На основании обобщения производственного опыта, итогов выполненного авторами исследования и данных многолетних наблюдений, осуществляемых сотрудниками Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства на стационарных опытных объектах выдвинуты следующие предложения по проектированию и назначению комплексных рубок в производных и вторичных лесах кисличного, черничного и брусничного типов лесорастительных условий Вологодской области (табл. 4):

1) в рубку назначаются вторичные и производные лиственные и лиственно-еловые древостои с наличием жизнеспособного елового элемента при широкой дифференциации высотно-возрастного строения ели;

2) в рубку назначаются древостои с высоким жизненным состоянием подпологовой ели (средний прирост в высоту более 10–15 см), минимальное количество которой в стадии молодняка составляет 3,0 тыс. шт./га; в средневозрастной стадии полнота должна быть не ниже 0,3–0,4;

3) рубки выполняются путем заготовки спелой и перестойной древесины (сплошные и выборочные) и одновременного применения классических видов рубок ухода за подростом и 2-м ярусом;

4) при рубке создаются оптимальные условия для главной лесообразующей породы, находящейся во 2-м ярусе и ярусе подроста, что достигается посредством проведения рубок различной интенсивности спелой и перестойной частей древостоя и определяется способами (видами) постепенной или выборочной системы рубок;

5) длительно-постепенные рубки целесообразны только в лиственных насаждениях с более низкой товарностью древостоя и высоким жизненным состоянием елового элемента леса. Равномерно-постепенные рубки рекомендуется выполнять при освоении насаждений с недостаточным количеством предварительного возобновления. В смешанных древостоях более сложного возрастного и морфологического строения комплексные рубки осуществляются путем вырубки части спелых и перестойных деревьев с одновременным уходом за молодыми, средневозрастными и приспевающими экземплярами, комплексная рубка сочетает приемы добровольно-выборочных рубок и рубок ухода;

6) максимальная интенсивность разреживания господствующего древесного яруса при 2-приемной рубке допускается до полноты 0,5. При ослабленном жизненном состоянии ели (прирост боковых побегов 3-го года больше центрального или его снижение за последние 5 лет на 40 % превышает показатель предыдущих лет) проводится 3-приемная рубка с интенсивностью рубки запаса за первый прием до 40–45 %;

7) при ослабленном жизненном состоянии подпологовой ели и ее возрасте выше 60–70 лет осуществляется первоначальное разреживание по 1-му ярусу древостоя до полноты не менее 0,4–0,5, что обеспечит успешность адаптации хвойного элемента леса к изменившимся условиям внешней среды;

8) для формирования ельников с производительностью по I, II классам бонитета достаточным является сохранение подроста в пределах 1,5–3,0 тыс. шт./га. Такой подход позволяет осуществлять более качественный уход (разреживание) за подростом;

9) разреживание подроста на ранней стадии его развития должно выполняться с применением селективного метода отбора, что будет способствовать выращиванию ельников из деревьев всех категорий (подрост, самосев) с лучшими наследственными свойствами, исключая их угнетение;

10) последующий уход за подростом (молодняком) проводится через 10–15 лет после рубки при его количестве 1,5–3,0 тыс. шт./га, через 5–7 лет – при количестве 4,5–6,0 тыс. шт./га.

Таблица 4

Организационно-технические параметры комплексных рубок
The organizational and technical parameters of complex logging

Характеристика древостоя	Количество подроста, тыс. шт./га	Мероприятия по	
		заготовке спелой и перестойной древесины	уходу за лесом
Одновозрастный, спелый по листовному ярусу с елью во 2-м ярусе и подростом. Участие хвойных пород в составе древостоя – до 3 ед.	Более 3,0	Сплошная рубка листовного яруса	Прочистки и прореживания: 1-й прием – в год рубки; 2-й прием – через 10–15 лет при количестве подроста 1,5–3,0 тыс. шт./га; через 5–7 лет при количестве подроста 4,5–6,0 тыс. шт./га
Одновозрастный, спелый по листовному ярусу со средневозрастной елью высокого жизненного состояния во 2-м ярусе и подростом	1,5 и более	Длительно-постепенные рубки листовного яруса: 1-й прием – в год рубки; 2-й прием – через 40 лет	Прочистки и прореживания: 1-й прием – в год рубки; 2-й прием – через 10–15 лет при количестве подроста 1,5–3,0 тыс. шт./га
Одновозрастный, спелый по листовному ярусу, с недостаточным количеством предварительного возобновления	0,5–0,7	Равномерно-постепенные рубки в 2–3 приема (3 приема – при первоначальной полноте 0,8 и более; 2 приема – при полноте менее 0,8). Полнота после 1-го приема – 0,6; после 2-го – 0,4, в 3-й прием убирается оставшаяся часть древостоя	Прочистки и прореживания проводятся в зависимости от возраста и густоты подроста одновременно с последним приемом равномерно-постепенной рубки
Сложный разновозрастный хвойно-лиственный с подростом	От 1,5 и более	Добровольно-выборочные рубки части спелых и перестойных деревьев листовных и хвойных пород. Интенсивность рубки по запасу – 25–40 %	Осветления, прочистки, прореживания и проходные рубки осуществляются в зависимости от возраста оставшейся части древостоя

Заключение

В лесном фонде Вологодской области широко распространены вторичные и производные лиственный-хвойные насаждения. Существует необходимость поиска научно обоснованных способов ведения хозяйства в таких древостоях с целью повышения запаса и ускорения выращивания ценной хвойной древесины. Одним из возможных вариантов решения этой задачи является своевременное и научно правильное проведение комплексных рубок.

Комплексные рубки не рассматриваются в действующем лесном законодательстве РФ, что связано с отсутствием достаточного научного обоснования и нормативного обеспечения для их осуществления. Однако многолетние исследования подтверждают целесообразность таких рубок во вторичных и производных лесах Вологодской области. Вырубка лиственных видов и одновременный уход за хвойным молодняком (подростом) позволяют сформировать ценные хвойные насаждения, улучшить рост и состояние хвойного яруса, увеличить производительность древостоя, т. е. повысить лесоводственную эффективность рубок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Алексеев П.В.* Березово-еловые насаждения МАССР и реконструкция их при главных рубках // Сб. тр. Поволж. ЛТИ. № 53. Йошкар-Ола, 1958. С. 43–53.
Alekseev P.V. Birch-Spruce Plantations of the Mari Autonomous Soviet Socialist Republic and Their Reconstruction during Major Felling. *Sbornik trudov Povlozhskogo lesotekhnicheskogo instituta*. Yoshkar-Ola, 1958, no. 53, pp. 43–53. (In Russ.).
2. *Вохминцев В.И.* Комплексные рубки в разновозрастных смешанных насаждениях // Изв. вузов. Лесн. журн. 1995. № 1. С. 23–26.
Vokhmintsev V.I. Complex Felling in Mixed Stands of Different Ages. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1995, no.1, pp. 23–26. (In Russ.).
3. *Гусев И.И.* Моделирование экосистем. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2002. 112 с.
Gusev I.I. *Ecosystem Modeling*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2002. 112 p. (In Russ.).
4. *Дружинин Ф.Н.* Лесоводственно-экологические основы восстановления ельников в производных лесах Восточно-Европейской равнины: дис. ... д-ра с.-х. наук. Вологда–Молочное, 2013. 389 с.
Druzhinin F.N. *Silvicultural and Ecological Principles of Restoration of Spruce Plantations in Secondary Forests of the East European Plain*: Dis. Doc. Agric. Sci. Vologda – Molochnoe, 2013. 389 p. (In Russ.).
5. *Дружинин Ф.Н.* К применению комплексных рубок // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 3. С. 17–23.
Druzhinin F.N. Application of Complex Cutting. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 3, pp. 17–23. (In Russ.).
6. *Залесов С.В.* Лесоводство. Урал. гос. лесотехн. ун-т. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 295 с.
Zalesov S.V. *Forestry*. Ural State Forestry Engineering University. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 295 p. (In Russ.).
7. *Кайрюкитис Л.А.* Формирование елово-лиственных молодняков. Каунас: ЛитНИИЛХ, 1959. 245 с.

Kairukshtis L.A. *Formation of Spruce-Deciduous Young Forests*. Kaunas, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, 1959. 245 p. (In Russ.).

8. Кайрюкштитис Л.А. Научные основы формирования высокопродуктивных елово-лиственных насаждений. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 208 с.

Kairyukshtis L.A. *Scientific Basis for the Formation of Highly Productive Spruce-Deciduous Stands*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 208 p. (In Russ.).

9. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Федер. агентство лесного хоз-ва, Федер. бюджет. учреждение «Сев. науч.-исслед. ин-т лесного хоз-ва»; сост. канд. с-х. наук Г.С. Войнов и др. Архангельск: Правда Севера, 2012. 672 с.

Forest Inventory Reference Book for the North-East of the European Part of the Russian Federation: (Regulatory Materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk and Vologda Regions and the Komi Republic). Federal Forestry Agency, Federal Budgetary Institution "Northern Forestry Research Institute"; comp. by cand. of agric. sci. G.S. Vojnov et al. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 2012. 672 p.

10. Мелехов И.С. Рубки главного пользования. 2-е изд., испр. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 374 с.

Melekhov I.S. *Main Fellings*. 2nd ed., revised and corrected. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 374 p. (In Russ.).

11. Мелехов И.С. Лесоводство. 2-е изд., испр. и доп. М.: МГУЛ, 2003. 320 с.

Melekhov I.S. *Forestry*. 2nd ed., revised and corrected. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2003. 320 p. (In Russ.).

12. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: АГТУ, 2007. 126 с.

Nakvasina E.N., Seryj V.S., Semenov B.A. *Field Practical Training in Soil Science*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2007. 126 p. (In Russ.).

13. Нестеров В.Г. Общее лесоводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1954. 656 с.

Nesterov V.G. *General Forestry*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1954. 656 p. (In Russ.).

14. Правила ведения лесного хозяйства. Издание Metsähallitus по лесному хозяйству / под ред. Т. Хокаярви, 2007. 61 с.

Forestry Regulations. Metsähallitus Forestry Publication. Ed. by T. Hokajarvi, 2007. 61 p. (In Russ.).

15. Сурина Е.А., Минин Н.С. Формирование смешанных сосново-березовых насаждений со вторым ярусом ели под влиянием рубок ухода // Сиб. лесн. журн. 2023. Т. 2. С. 26–32.

Surina E.A., Minin N.S. Formation of Mixed Pine-Birch Stands with a Second Storey of Spruce under the Influence of Thinning. *Sibirskij lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2023, vol. 2, pp. 26–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20230203>

16. Тиходеева М.Ю., Лебедева В.Х. Практическая геоботаника (анализ состава растительных сообществ). СПб.: С.-Петербург. ун-т, 2015. 164 с.

Tikhodeeva M.Yu., Lebedeva V.Kh. *Practical Geobotany (Analysis of the Composition of Plant Communities)*. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2015. 164 p. (In Russ.).

17. Чибисов Г.А., Вялых Н.И., Минин Н.С. Рубки ухода за лесом на Европейском Севере: практ. пособие. Архангельск: СевНИИЛХ, 2004. 128 с.

Chibisov G.A., Vyalykh N.I., Minin N.S. *Forest Thinning in the European North: Practical Guide*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry Publ., 2004. 128 p. (In Russ.).

18. Щекалев Р.В., Корчагов С.А., Данилов Д.А., Мелехов В.И., Бабич Н.А., Антонов О.И., Грибов С.Е., Зайцев Д.А. Древесиноведение на лесоводственной основе. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2023. 381 с.

Shchekalev R.V., Korchagov S.A., Danilov D.A., Melekhov V.I., Babich N.A., Antonov O.I., Gribov S.E., Zaytsev D.A. Wood Science on a Silvicultural Basis. Moscow, KMK Publ. House, 2023. 381 p. (In Russ.).

19. Bose A.K., Harvey B.D., Brais S., Beaudet M., Leduc A. Constraints to Partial Cutting in the Boreal Forest of Canada in the Context of Natural Disturbance-Based Management: a Review. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2014, vol. 87, iss. 1, pp. 11–28. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt047>

20. Götmark F., Paltto H., Nordén B., Götmark E. Evaluating Partial Cutting in Broadleaved Temperate Forest under Strong Experimental Control: Short-Term Effects on Herbaceous Plants. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 214, iss. 1–3, pp. 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.052>

21. Huang Y., Ai X., Yao L., Zang R., Ding Y., Huang J., Feng G., Liu J. Changes in the Diversity of Evergreen and Deciduous Species during Natural Recovery Following Clear-Cutting in a Subtropical Evergreen-Deciduous Broadleaved Mixed Forest of Central China. *Tropical Conservation Science*, 2015, vol. 8(4), pp. 1033–1052. <https://doi.org/10.1177/194008291500800413>

22. Marčeta D., Petković V., Ljubojević D., Potočnik I. Harvesting System Suitability as Decision Support in Selection Cutting Forest Management in Northwest Bosnia and Herzegovina. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, vol. 41, no. 2, pp. 251–265. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.744>

23. Martynova M., Sultanova R., Blonskaya L., Gabdelkhakov A., Volkova E., Odintsov G. Effectiveness of Tending Activities in Broadleaved Forests. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2021, vol. 9(4), pp. 319–330. <https://doi.org/10.5890/JEAM.2021.12.001>

24. Mederski P.S., Schweier J., Đuka A., Tsioras P., Bont L.G., Bembenek M. Mechanised Harvesting of Broadleaved Tree Species in Europe. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00154-7>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 631.417.1:630.90

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-83-97

Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов

Н.В. Малышева[✉], канд. геогр. наук, доц.; ResearcherID: [ABI-5705-2020](https://orcid.org/0000-0002-4264-3157),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4264-3157>

Т.А. Золина, вед. инж.; ResearcherID: [HNQ-4731-2023](https://orcid.org/0009-0009-1041-872X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-872X>

А.Н. Филипчук, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [HJB-1685-2022](https://orcid.org/0000-0003-4024-1696),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-1696>

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; nat-malysheva@yandex.ru[✉], tzolina@gmail.com, aflipchuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.06.23 / Одобрена после рецензирования 10.09.23 / Принята к печати 14.09.23

Аннотация. В почвенном пуле содержатся основные запасы органического углерода преимущественно бореальных лесов России. Количественные оценки запасов углерода пула почв значительно варьируют. Это объясняется высокой временной и пространственной изменчивостью содержания органического углерода в почвах, недостатком эмпирических данных для ряда регионов, различием подходов к оценке углерода почв и плотности сложения почвенных горизонтов, принятой в расчет мощностью почвенного слоя, включением в почвенный пул запасов углерода лесной подстилки, слоя торфа и др. В 2020 г. выборочно-статистическим методом завершен 1-й цикл государственной инвентаризации лесов России. Получены лесотаксационные характеристики, экологические показатели и информация о лесорастительных условиях для 69,1 тыс. постоянных пробных площадей. Ограниченность данных полевых описаний почв обуславливает необходимость апробации комплексного подхода к использованию материалов государственной инвентаризации лесов в программной среде геоинформационных систем в сочетании с цифровыми ресурсами открытого доступа в целях оценки запасов углерода в почвенном пуле. Разработана и экспериментально опробована методика количественной оценки запасов углерода в пуле лесных почв. Предложенная методика включает: 1) геокодирование пробных площадей; 2) приведение исходных данных государственной инвентаризации лесов о типах почв к стандартной классификации; 3) использование цифровых ресурсов Мирового центра данных о почвах SoilGrids для получения эталонных средних запасов углерода на сети пробных площадей государственной инвентаризации лесов; 4) расчет общего запаса углерода в почвенном пуле лесных земель по средним запасам углерода SoilGrids и площадям стандартных типов почв по материалам государственной инвентаризации лесов. Экспериментальная апробация выполнена на примере Республики Карелии. Объем выборки составил 667 пробных площадей. По результатам исследования, преобладающий комплекс типов почв – подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые (без разделения) / подзолы иллювиально мало- и много-гумусовые – занимает площадь 7,28 млн га. Общий запас углерода почв в слое 0–30 см для лесных земель республики оценен в 773,9 Мт С при средних 79,1 т С/га.

Ключевые слова: запас углерода, почвы, государственная инвентаризация лесов, постоянные пробные площади, геоинформационные системы, цифровые картографические ресурсы, базы почвенных данных открытого доступа, Республика Карелия

Благодарности: Авторы выражают благодарность ФГБУ «Рослесинфорг» за предоставление материалов государственной инвентаризации лесов для модельного объекта. Исследование проведено в рамках госзадания ФБУ «ВНИИЛМ» на 2022 г., приказ Рослесхоза 23.12.2021 № 975. Код (шифр) темы – 1-Л21 ГИЛ (7/22).

Для цитирования: Малышева Н.В., Золина Т.А., Филипчук А.Н. Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 83–97. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>

Original article

Carbon Stocks in Soils Based on the State Forest Inventory Data

Nataliya V. Malysheva[✉], Candidate of Geography, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABI-5705-2020](https://orcid.org/0000-0002-4264-3157), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4264-3157>

Tatiana A. Zolina, Leading Engineer; ResearcherID: [HNQ-4731-2023](https://orcid.org/0009-0009-1041-872X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-872X>

Andrey N. Filipchuk, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [HJB-1685-2022](https://orcid.org/0000-0003-4024-1696),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-1696>

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow Region, 141202, Russian Federation; nat-malysheva@yandex.ru[✉], tzolina@gmail.com, afilipchuk@yandex.ru

Received on June 9, 2023 / Approved after reviewing on September 10, 2023 / Accepted on September 14, 2023

Abstract. The main organic carbon stocks in the predominantly boreal forests of Russia are contained in the soil pool. Quantitative estimates of soil pool carbon stocks vary considerably. This is due to the high temporal and spatial variability of the organic carbon content in soils, the lack of empirical data for a number of regions, the difference in approaches to assessing soil carbon and the density of soil horizons, the thickness of the soil layer taken into account, the inclusion of forest litter carbon stocks, the peat layer, etc. In 2020, the 1st cycle of the State Forest Inventory in Russia was completed using a selective statistical method. Forest inventory characteristics, environmental indicators and information on forest growth conditions have been obtained for 69.1 thousand permanent sample plots. The limited availability of field descriptions of soils necessitates the testing of an integrated approach to using the State Forest Inventory data in the software environment of geographic information systems in combination with open-access digital resources to assess carbon stocks in the soil pool. A methodology for quantitative assessment of carbon stocks in the forest soil pool has been developed and experimentally tested. The proposed methodology includes: 1) geo-referencing of sample plots; 2) bringing the initial data of the State Forest Inventory on soil types to a standard classification; 3) using the digital resources of the World Data Center for Soils (SoilGrids) to obtain reference average carbon stocks on the network of sample plots surveyed during the State Forest Inventory; 4) calculating the total carbon stock in the soil pool of forest lands based on the average carbon stocks of SoilGrids and areas of standard soil types based on the data of the State Forest Inventory. The experimental testing



has been carried out using the Republic of Karelia as an example. The sample size has been 667 permanent sample plots. According to the results of the study, the predominant complex of soil types – illuvial-ferruginous and illuvial-humus podzols (without division), illuvial low- and high-humus podzols – covers an area of 7.28 mln ha. The total carbon stock in the 0–30 cm soil layer for the forest lands of the Republic of Karelia is estimated at 773.9 Mt C with an average of 79.1 t C/ha.

Keywords: carbon stock, soils, State Forest Inventory, permanent sample plots, geographical information systems, digital cartographic resources, open-access soil databases, the Republic of Karelia

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the Federal State Budgetary Institution “Roslesinform” for providing the State Forest Inventory data for the model site. The research has been conducted within the framework of the state assignment for the Federal State Budgetary Institution “All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry” for 2022; order of the Federal Forestry Agency no. 975 dated December 23, 2021. The research topic code (cipher) – 1-L21 GIL (7/22).

For citation: Malysheva N.V., Zolina T.A., Filipchuk A.N. Carbon Stocks in Soils Based on the State Forest Inventory Data. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1, pp. 83–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>

Введение

Почвенный пул является основным по запасу органического углерода для преимущественно бореальных лесов России. В верхних слоях почв (1 м) сосредоточено 20 % мировых запасов почвенного органического углерода, тогда как территория России составляет порядка 12,5 % общемировой площади суши [9]. По оценке ученых Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, лесные почвы содержат более 1/2 органического углерода почв России, или около 170 Гт С, из которых в болотах сосредоточено 100,9 Гт С, а в заболоченных землях – 12,6 Гт С. Углерод почвы превышает запасы углерода в биомассе лесов России в 7,5 раза, другими словами, 88 % общих запасов углерода, накопленных за столетия и тысячелетия, находится в почве [8, 9]. Среди всех углеродных пулов запасы углерода почв остаются наименее согласованными в региональном, национальном и глобальном масштабах. Методическое руководство Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [26] отмечает недостаточный уровень современных знаний для учета запасов углерода в почвенном пуле, значительную вариативность содержания углерода в почвах, вызванную спецификой лесорастительных условий, нарушениями природного и антропогенного характера, конверсией земель при смене типа землепользования, и, как следствие, высокий уровень неопределенности оценок. Отсюда вытекает отсутствие информации о плотности сложения почвенных горизонтов в базах данных с характеристиками профилей почв, что связано также с трудоемкостью определения этого параметра [19, 20, 33, 36].

Данные о запасах углерода лесных почв России имеют большой разброс, причины которого как в недостатке эмпирических сведений, особенно для регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока, так и в различии методических подходов. Влияние на результат оказывают методы оценки углерода в органическом веществе почв, плотности сложения почвенных горизонтов, мощности почвенного слоя, включение или исключение органического углерода, содер-

жащегося в лесных подстилках, слое торфа и др. В связи с важной ролью этого пула в биохимических процессах и неопределенностью его оценок разработка методов объективного учета запасов органического вещества лесных почв России актуальна.

Фундаментальные и прикладные исследования в рамках данного научного направления выполняются Институтом физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущинским научным центром биологических исследований, Институтом леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Почвенным институтом им. В.В. Докучаева, Почвенным факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова, Институтом прикладного системного анализа (ИАСА), Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Институтом леса Карельского научного центра РАН и др. [3–5, 8–10, 14, 16, 17, 20–25, 27, 31, 33].

Первое обобщение данных о запасах органического углерода по группам почв и таксонам лесорастительного деления России сделано в работах [16, 27]. Масштабные по тематике и географическому охвату комплексные исследования, выполненные научным коллективом Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, позволили дополнить данные, собранные ранее преимущественно по литературным источникам [16, 27], и заложить основы методики оценки запасов углерода в почвенном пуле лесных территорий России [5, 25, 31]. Полученные разными авторами оценки запасов углерода в пуле лесных почв значительно варьируют (табл. 1).

Таблица 1

Запасы органического углерода в пуле лесных почв России
The organic carbon stocks in the forest soil pool of Russia

Характеристика почв	Запас углерода, Гт С	Источник данных
Минеральные горизонты почв, слой 0–50 см	86,3	[16, 27]
Торф	54,0	
Слой почв 0–30 см	84,5	[23]
0–50 см	104,3	
0–100 см	137,1	
Толща почвы 1 м, включая торфопокрытые избыточно увлажненные земли и подстилку	170,0	[13]
Толща почвы 1 м, включая подстилку	144,5	[24]
Толща почвы 1 м без подстилки	136,2	
Толща почвы 1 м, включая подстилку	144,5	[31]
	191,9	[25]
Управляемые* лесные земли (664,5 млн га), слой почв 0–30 см	60,0	[11]

*Согласно методологии МГЭИК [11, 15], управляемые – земли, на которых осуществляется систематическая антропогенная деятельность в целях реализации социальных, производственных и экологических задач.

В последние годы проведены масштабные работы по систематизации, обобщению и представлению сводных и средних запасов органического углерода почв на картах. В открытом доступе появились: единый государственный реестр почвенных ресурсов и цифровая карта почв России масштаба 1:2 500 000, предоставленные Почвенным институтом им. В.В. Докучаева [6];

почвенно-географическая база данных России и Национальный атлас почв России, поддерживаемые Почвенным дата-центром МГУ им. М.В. Ломоносова [2, 14].

Новым информационным источником, беспрецедентным по территориальному охвату и объему наземных измерений качественных и количественных характеристик лесов России, могут служить данные государственной инвентаризации лесов (ГИЛ). В 2020 г. в Российской Федерации выборочно-статистическим методом завершён 1-й цикл ГИЛ. На 69,1 тыс. постоянных пробных площадей (ППП) учтены 117 показателей, в т. ч. описан тип почв, установлены мощность гумусового горизонта, механический состав, влажность, наличие, тип и степень эрозии [18]. После статистической обработки сводные данные обследований ППП предоставлены в утверждённой Рослесхозом форме и опубликованы по субъектам. Оценка запасов углерода почвенного пула современным регламентом ГИЛ не предусмотрена.

Использование данных натуральных описаний лесных почв на ППП для оценки запасов углерода наталкивается на ряд методических ограничений. Определение типа почв по горизонту А, как предусмотрено нормативными документами, не позволяет достоверно отнести его к конкретной классификационной единице. Эти же нормативные документы содержат лишь рекомендацию использовать принятую классификацию почв России, а не указание на отдельный стандарт. Следовательно, исполнители могут свободно толковать типологические единицы, что приводит к разнородным описаниям почв, которые трудно систематизировать. Кроме того, получение необходимых показателей для оценки углерода: мощности горизонтов почв, плотности сложения по горизонтам, содержания органического вещества, крупных фракций и др. – требует владения методами специальных почвенных обследований. Помимо этого, необходимо закладывать не прикопки у границ ППП в соответствии с регламентом ГИЛ, а опорные почвенные разрезы до почвообразующей породы для их описания и отбора образцов по почвенному профилю, последующего лабораторного анализа образцов на специальном оборудовании и т. д. Такой анализ существенно увеличивает трудоёмкость работ и неизбежно приведёт к увеличению финансовых затрат на ведение ГИЛ.

Национальные инвентаризации лесов (НИЛ) в странах с многолетним опытом практического ведения таких работ включают сбор образцов по почвенному профилю на ППП и определение их количественных характеристик в лабораторных условиях. Подобные изучения навесок лесных почв выполняют при ведении НИЛ в Швеции [34], Финляндии [30, 35], США [28]. Однако и в этих странах учёт запасов углерода лесных почв по данным лабораторных анализов образцов проводится не с 1-х циклов НИЛ: в Швеции – с 1983 г., т. е. с 12-го цикла НИЛ; в Финляндии – с 1971–1976 гг., 6-й цикл. Примечательно, что по результатам анализа образцов, собранных на ППП НИЛ в Швеции, получают не модельные [29], а фактические химические и физические характеристики почв: содержание углерода, азота, металлов по почвенному профилю, плотность сложения горизонтов, кислотность почв и др. (<https://www.slu.se/institutioner/mark-miljo/miljoanalys/markinfo/markkemi/>).

В нашей стране в ходе 1-го цикла ГИЛ подобные работы не проводились, поэтому описание лесных почв не подкреплено количественными значениями

мощности почвенных горизонтов, плотности сложения в зависимости от типа и гранулометрического состава почв и пр. Руководства МГЭИК [15, 26], задающие стандарты учета запасов и поглощения углерода лесными экосистемами, рекомендуют оценивать массу органического углерода почвы по образцам, взятым на ППП.

Признавая методически упрощенный подход к сбору данных о почвах в ходе ГИЛ, целесообразно принять во внимание выборку данных представительного объема для оценки запасов углерода почвенного пула. Можно попытаться использовать ее в сочетании с цифровыми ресурсами открытого доступа, нормативно-справочными материалами и литературными источниками, разработав косвенный метод оценки. Заметим, что оценки запасов углерода почв России и регионов, выполненные авторитетными научными коллективами, включая МГУ им. М.В. Ломоносова, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, ПАСА, получены моделированием с опорой на почвенные карты. Используя базу данных эталонов, созданную по типичным почвенным разрезам и имеющим координатную привязку, экстраполируют локальные измерения и описания в границах ареалов типов почв. Основная проблема применения такого подхода – недостаточное количество полевых наблюдений и лабораторных измерений органического углерода почв. Выборка типичных почвенных профилей, неравномерно представленных по территории страны, как правило, невелика. Например, О.В. Честных с соавт. [23] приводит размер выборки из 883 почвенных профилей, включая 538 описаний для Европейской части России. В публикации [22] этого научного коллектива объем выборки для Европейско-Уральской части России – 675 почвенных разрезов. База данных почвенных профилей в работах ПАСА и Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН [24, 25] содержит 1 068 записей с эталонными значениями по [33] и другим источникам.

Цель исследования – разработать методику количественной оценки запасов углерода в пуле лесных почв, основанную на сочетании материалов ГИЛ 1-го цикла и цифровых ресурсов открытого доступа, с ее экспериментальной апробацией на примере Республики Карелии.

Объекты и методы исследования

При ведении ГИЛ выполняют методически однотипные обследования почв на ППП. Почвенную прикопку глубиной 30–50 см размещают за границей ППП на расстоянии не более 5 м. Заметим, что рекомендуемая МГЭИК мощность (глубина) почвенного слоя для измерения углеродных параметров пула почвы сходная – не менее 30 см [15]. Описание почв включает диагностику типа, механического состава и влажности, а также толщины (мощности) гумусового горизонта, наличия, типа и степени эрозии. При последующей статистической обработке результатов обследований ППП получают итоговые данные о распределении площади лесных земель: по типам почв, типам и степени эрозии, механическому составу и влажности. Сводные результаты обследования представляют в типовой форме по субъектам и лесным районам.

Объект исследования – почвы Республики Карелии. Источник исходных данных – результаты статистической обработки данных 1-го цикла ГИЛ, опубликованные в Аналитическом обзоре 2020 г. [1]. Общий объем выборки по модельному объекту – 667 ППП. Лесные земли республики в соответствии с современным отраслевым лесорастительным районированием отнесены к 2 лесорастительным подзонам и соответственно лесным районам: северной

(Карельский северо-таежный лесной район – 50,4 % территории) и средней (Карельский таежный – 49,6 %) тайги [1].

По результатам обследований ГИЛ, на территории модельного объекта преобладают среднеподзолистые (38,1 %) и слабоподзолистые (18,7 %) почвы. Почвы с промывным типом водного режима (автоморфные) занимают 76 % площади, с застойным типом (гидроморфные) – 2 %. Почвы легкого механического состава (песчаные и супесчаные) представлены на 70 % территории, тяжелого механического состава (глины легкие, средние, тяжелые) – на 5 % [1].

В основе методологии исследования лежит оперирование комплексом источников данных (в англоязычной литературе, multi-source approach [32]) в программной среде геоинформационных систем (ГИС): материалами ГИЛ с описанием почв на ППП и распределением площади лесных земель по типам почв; картографическими ресурсами и базами почвенных данных открытого доступа. ГИС со стандартным набором инструментов пространственного анализа и возможностью работы с данными, имеющими пространственную привязку, позволяют оперировать комплексом показателей. Методика работ включает следующие этапы:

1. Геокодирование. В силу режимных ограничений координаты ППП ГИЛ недоступны пользователям. Обладая информацией о принадлежности ППП к лесничеству и его кварталу, можно определить пространственное положение ППП. Геокодирование состоит в координатной привязке ППП ГИЛ, расположение которых задается адресными сведениями из таблиц, к картографической основе. Геокодирование – стандартная операция в профессиональных ГИС-пакетах.

2. Приведение таксонов почв в материалах ГИЛ к стандартной классификации типов / комплекса типов почв. Описания почв на ППП ГИЛ имеют существенный недостаток. Типы почв, которые заносят в базу данных ГИЛ, отличны от стандартной классификации, разнородны, названия наследуют классификацию типов / комплекса типов лесных почв разного времени. Оверлейные процедуры ГИС позволяют сопоставить типы почв в материалах ГИЛ с типами почв в стандартной классификации 2004 г. [7].

3. Использование базы данных о мировых почвенных ресурсах для получения средних значений запасов углерода на ППП ГИЛ. Координатная привязка ППП методом геокодирования в среде ГИС дает возможность совместить данные ГИЛ с любыми картографическими ресурсами открытого доступа в сети Интернет. Международный почвенный справочно-информационный центр (ISRIC) – Мировой центр данных о почвах – поддерживает базы данных о почвенных ресурсах с географической привязкой (<https://library.wur.nl/WebQuery/isric/start>). Свободно доступные продукты ISRIC содержат данные о почвах и обновляемые цифровые карты с характеристиками почв мира, включая распределение запасов углерода в пуле почв по типам с пространственным разрешением 1 км и 250 м (SoilGrids). Карты составлены на основе эталонов – почвенных профилей, приведенных к единым стандартам, и пространственной экстраполяции эталонных значений по типам почв в классификации Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО). Доступ к цифровым данным открыт и предоставляется через веб-карту, размещенную на портале SoilGrids.org (<https://soilgrids.org>).

4. Расчет итоговых значений запаса углерода в почвенном пуле для всех лесных земель тестового объекта.

Результаты исследования и их обсуждение

Предложенная методика экспериментально опробована на примере Республики Карелии.

1. По номеру квартала и названию лесничества, заданных в текстовом формате, осуществлена координатная привязка ППП ГИЛ. Выборка ППП не-систематическая, расположение точек в пространстве нерегулярное, поэтому для преобразования локальных значений точечного покрытия в площадное использован специальный инструмент ГИС. Полнофункциональные ГИС-пакеты содержат модуль экстраполяции локальных значений на площадь, с помощью которого из слоя точек получают слой полигонов (площадных объектов). Преобразование имеет такие преимущества, как пространственная визуализация распределения типов почв ареалами по данным измерений на ППП, локализованным в точках (рис. 1).

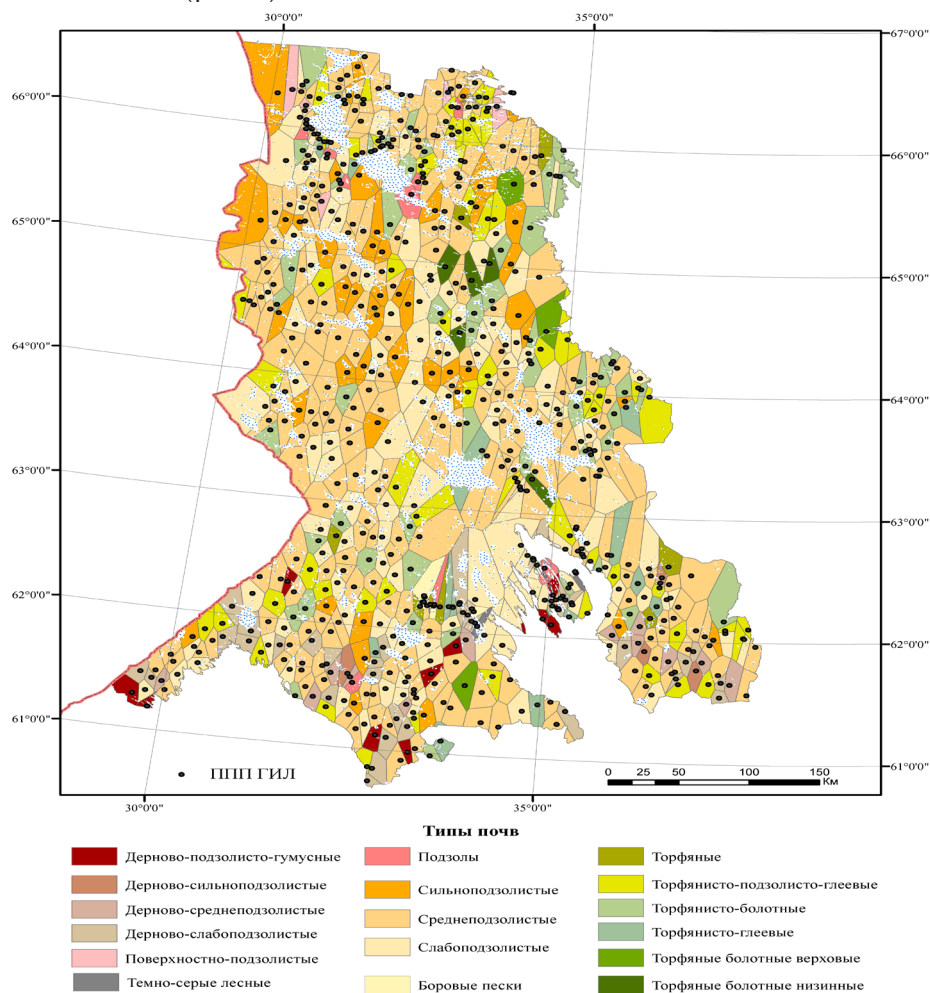


Рис. 1. Ареалы типов почв, построенных по описаниям почв на ППП ГИЛ с координатной привязкой. Республика Карелия

Fig. 1. The dissemination of soil types plotted according to the descriptions of soils on the permanent sample plots of the State Forest Inventory with a coordinate reference. The Republic of Karelia

2. Для приведения разнородных описаний типов почв на ППП к стандартной классификации использована цифровая почвенная карта России масштаба 1:2 500 000, созданная Почвенным институтом им. В.В. Докучаева на базе аналоговой [12] и обновленная [13]. С 2014 г. данным институтом поддерживается единый государственный реестр почвенных ресурсов, содержащий почвенно-географическую базу данных и пакет файлов почвенной карты России в формате .shp [6]. Совмещение ППП с почвенной картой и почвенно-географической базой данных (оверлей) дает соответствие типов почв на ППП стандартной классификации и пространственную картину принадлежности ППП к ареалам стандартных типов почв, что позволяет оценить площадь, занимаемую типами почв всех лесных земель модельного объекта.

3. Для получения средних запасов углерода координатно привязанные ППП совмещены с цифровой картой мировых почвенных ресурсов SoilGrids250m и базой данных о средних запасах углерода в почвенном слое 0–30 см, размещенных на платформе SoilGrids.org (рис. 2). Геостатистическое моделирование дает возможность провести интерполяцию запасов углерода, соотношенных с местоположением ППП, использовать рассчитанный на основе автокорреляции средневзвешенный показатель (рис. 3) и создать непрерывную поверхность значений.

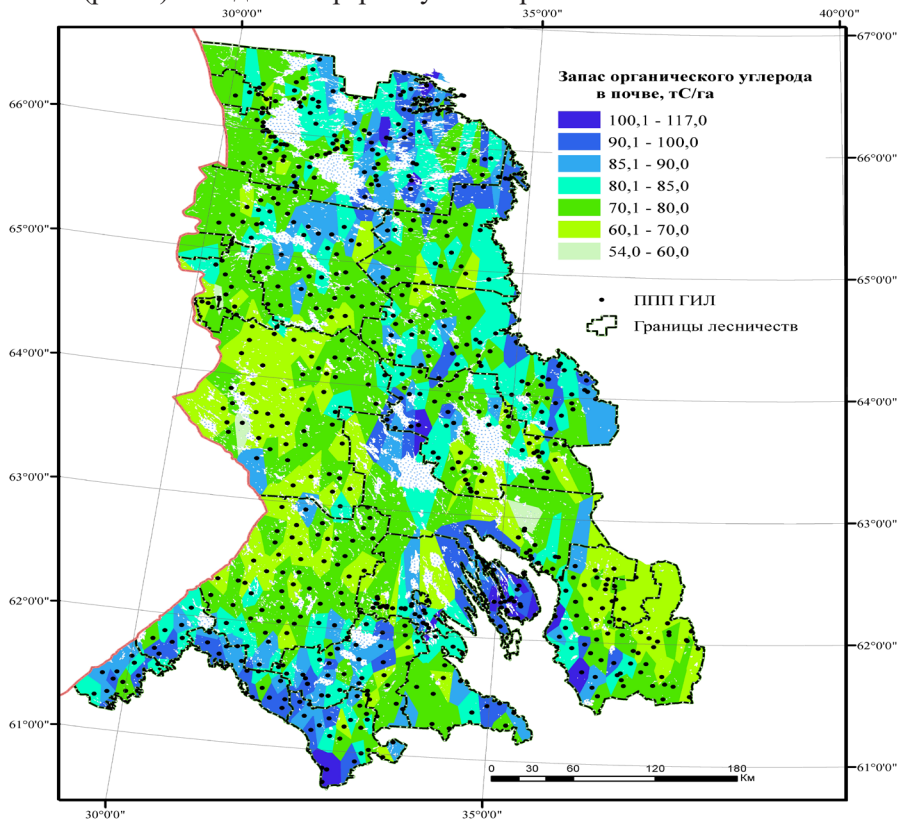


Рис. 2. Средние запасы органического углерода в слое почв 0–30 см по данным ресурса SoilGrids в границах ареалов, построенных по ППП ГИЛ. Республика Карелия

Fig. 2. The average organic carbon stocks in the 0–30 cm soil layer according to the SoilGrids data within the boundaries of the areas plotted according to the permanent sample plots of the State Forest Inventory. The Republic of Karelia

Таблица 2

Площадь по типам почв и запасы углерода (Республика Карелия)
The area by soil types and carbon stocks (The Republic of Karelia)

Тип почв / комплекс типов [7]	Площадь, тыс. га	Средний запас углерода в слое 0–30 см, т С/га	Общий запас углерода в пуле лесных почв, Мт С
Подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые (без разделения), иллювиально мало- и много-гумусовые	7 280,7	76,60	557,7
Подзолы иллювиально-железистые/-гумусовые (много-гумусовые)	453,3	82,36	37,3
Подзолистые	925,7	94,25	87,2
Подзолы иллювиально-гумусовые/железистые/глеевые торфянистые	101,1	81,33	8,2
Подзолы глеевые торфянистые и торфяные, преимущественно иллювиально-гумусовые	989,9	81,55	80,7
Торфяные болотные верховые/переходные	34,2	77,08	2,6
<i>Всего</i>	9 785,0	79,10	773,9

Использована информация о площади, занимаемой древесными породами, с распределением по группам возраста и о принадлежности пород к таксонам лесорастительного районирования, содержащиеся в материалах ГИЛ. Общие запасы углерода в слое почв 0–30 см составляют 709,3–710,6 Мт С (табл. 3). Небольшие различия в итоговых оценках обусловлены разницей коэффициентов средних запасов углерода почв по данным [23] и нормативно-справочным материалам Минприроды. Сопоставимость результатов свидетельствует о правомерности разработанной методики.

Таблица 3

Сравнение запасов углерода в пуле лесных почв для слоя 0–30 см по данным ГИЛ и Национального кадастра ПГ (Республика Карелия)
The comparison of carbon stocks in the forest soil pool for the 0–30 cm layer according to the State Forest Inventory and the National Greenhouse Gas Inventory (The Republic of Karelia)

Запас углерода	Расчет по данным ГИЛ и карте почв мира ресурса SoilGrids	Расчет с данными ГИЛ по площадям древесных пород и справочным материалам [23]	Расчет с данными ГИЛ по площадям древесных пород и нормативно-справочным материалам Минприроды	Национальный кадастр ПГ
Всего, Мт С	773,9	710,6	709,3	499,4
Среднее, т С/га	79,1	72,6	72,5	52,6

При подготовке Национального доклада о кадастре выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов (далее – Национальный кадастр ПГ) расчет запасов углерода почвенного пула проводился путем умножения площади, занимаемой группами древесных пород, с делением на группы возраста на коэффициент средних запасов углерода, приведенный в нормативно-справочных материалах Минприроды. В Национальном кадастре ПГ по состоянию на 2020 г. [11] общие запасы углерода в слое лесных почв Карелии 0–30 см оценены в 499,4 Мт С при средних значениях 52,6 т С/га.

Итоговая величина, полученная нами, соответствует данным расчетов, в которых использованы коэффициенты средних запасов углерода почв по [23] и нормативно-справочным материалам Минприроды, но существенно отличается от приведенной в [11] – 499,5 Мт С. Наше значение на $\approx 54,9$ % больше в сравнении с [11], при расхождении средних показателей >50 %. Заметим, что количественные показатели запаса органического углерода в почвенном слое 0–30 см для Республики Карелии в [11] практически не меняются в хронологическом ряду с 2009 г. и, вероятно, недооценены.

Заключение

Разработана методика комплексного использования материалов государственной инвентаризации лесов с описаниями почв и информацией об их площади и цифровых ресурсов открытого доступа Мирового центра данных о почвах (SoilGrids) в программной среде геоинформационных систем для оценки запасов органического углерода почвенного пула. Экспериментальная проверка методики на примере Республики Карелии подтвердила работоспособность предложенного способа и непротиворечивость результатов данным, полученным расчетным путем и модельными методами. Рассмотренный метод, наряду с уже применяемыми, может быть рекомендован для количественной характеристики запасов углерода почв лесных земель по регионам, таксонам лесорастительного зонирования и России в целом, что будет способствовать совершенствованию оценивания и согласованности результатов. В настоящее время он предложен для апробации производственным подразделениям, осуществляющим работы по государственной инвентаризации лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аналитический обзор о состоянии лесов, их количественных и качественных характеристиках по Республике Карелия. М.: Рослесинфорг, 2020. 78 с.
Analytical Review of the State of Forests, Their Quantitative and Qualitative Characteristics in the Republic of Karelia. Moscow, Roslesinfor, 2020. 78 p. (In Russ.).
2. Атлас почв Российской Федерации. Информационная система «Почвенно-географическая база данных России». М.: Почвенный дата-центр МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. Режим доступа: <https://soil-db.ru/map> (дата обращения: 11.12.24).
Atlas of Soils of the Russian Federation. Information System "Soil and Geographical Database of Russia". Moscow, the Moscow State University named after M.V. Lomonosov Soil Data Center, 2022. (In Russ.).
3. Бахмет О.Н. Особенности органического вещества почв в лесных ландшафтах Карелии // Лесоведение. 2012. № 2. С. 19–27.

Bakhmet O.N. Specific Features of Soil Organic Matter in Forest Landscapes of Karelia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 2, pp. 19–27. (In Russ.).

4. Бахмет О.Н. Запасы углерода в почвах сосновых и еловых лесов Карелии // Лесоведение. 2018. № 1. С. 48–55.

Bakhmet O.N. Carbon Storages in Soils of Pine and Spruce Forests in Karelia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 1, pp. 48–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0024114818010047>

5. Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сиб. экол. журн. 2005. № 4. С. 631–649.

Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B. Forests and Swamps of Siberia in the Global Carbon Cycle. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2005, vol. 1, pp. 168–182. <https://doi.org/10.1134/S1995425508020021>

6. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 2014. Режим доступа: <https://egrpr.esoil.ru/content/1DB.html> (дата обращения: 11.12.24).

Unified State Register of Soil Resources of Russia. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute, 2014. (In Russ.).

7. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с. *Classification and Diagnosis of Soils in Russia*. Smolensk, Ojkuмена Publ., 2004. 343 p. (In Russ.).

8. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060.

Kudeyarov V.N. Current State of the Carbon Budget and the Capacity of Russian Soils for Carbon Sequestration. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2015, no. 9, pp. 1049–1060. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>

9. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России: моногр. М.: Наука, 2007. 315 с.

Kudeyarov V.N., Zavarzin G.A., Blagodatskij S.A., Borisov A.V., Voronin P.Yu., Demkin V.A., Demkina T.S., Evdokimov I.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Komarov A.S., Kurganova I.N., Larionova A.A., Lopez de Gerenu V.O., Utkin A.I., Chertov O.G. *Carbon Pools and Flows in Russian Terrestrial Ecosystems*: Monograph. Moscow, Nauka Publ., 2007. 315 p. (In Russ.).

10. Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 46–59.

Nakvasina E.N., Shumilova Yu.N. Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 46–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-46-59>

11. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 2. Приложения. М.: ИГКЭ Росгидромет, 2022. 111 с.

National Inventory Report on Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Part 2. Annexes. Moscow, Institute of Global Climate and Ecology Roshydromet Publ., 2022. 111 p. (In Russ.).

12. Почвенная карта РСФСР масштаба 1:2 500 000 / под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988.

Soil Map of the Russian Soviet Federative Socialist Republic at a Scale of 1 : 2 500 000. Ed. by V.M. Friedland. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography, 1988. (In Russ.).

13. Почвенная карта России (скорректированная цифровая версия Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2500000) / под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 2007.

Soil Map of Russia (Corrected Digital Version of the Soil Map of the RSFSR in at a Scale of 1 : 2500 000). Ed. by V.M. Friedland. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography, 2007. (In Russ.).

14. Рожков В.А., Алябина И.О., Колесникова В.М., Молчанов Э.Н., Столбовой В.С., Шоба С.А. Почвенно-географическая база данных России // Почвоведение. 2010. № 1. С. 3–6.

Rozhkov V.A., Alyabina I.O., Kolesnikova V.M., Molchanov E.N., Stolbovoi V.S., Shoba S.A. Soil-Geographical Database of Russia. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2010, vol. 43, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1134/S1064229310010011>

15. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г.: в 5 т. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Япония: Институт глобальных стратегий окружающей среды, 2007. 83 с.

2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: in 5 Volumes. Vol. 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Japan, Institute of Global Environmental Strategies, 2007. 83 p. (In Russ.).

16. Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексеева, Р.А. Бердси. Красноярск: ЭКОС, 1994. 210 с.

Carbon in Forest and Swamp Ecosystems of Russia. Ed. by V.A. Alexeyev, R.A. Birdsey. Krasnoyarsk, EKOS Publ., 1994. 210 p. (In Russ.).

17. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: КарНИЦ РАН, 2003. 260 с.

Fedorets N.G., Bakhmet O.N. *Ecological Features of Transformation of Carbohydrate and Nitrogen Compounds in Forest Soils*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 260 p. (In Russ.).

18. Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Федоров С.В., Бердов А.М., Косицын В.Н., Югов А.Н., Кинигопуло П.С. Аналитический обзор количественных и качественных характеристик лесов Российской Федерации: итоги первого цикла государственной инвентаризации лесов // Лесохоз. информ. 2022. № 1. С. 5–34.

Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Zolina T.A., Fedorov S.V., Berdov A.M., Kositsyn V.N., Yugov A.N., Kinigopulo P.S. Analytical Review of the Quantitative and Qualitative Characteristics of Forests in the Russian Federation: Results of the First Cycle of the State Forest Inventory. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2022, no. 1, pp. 5–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.01>

19. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепасченко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2021, vol. 54, pp. 325–336. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>

20. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.

Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of Organic Carbon Stocks in Forests Soils on a Regional Scale. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2020, vol. 53, pp. 339–348. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030023>

21. Чертов О.Г. Экология лесных земель (почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний). Л.: Наука, 1981. 192 с.

Chertov O.G. *Ecology of Forest Lands (Soil and Ecological Study of Forest Habitats)*. Leningrad, Nauka Publ., 1981. 192 p. (In Russ.).

22. Честных О.В., Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г. Углерод почв лесных районов Европейско-Уральской части России // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3, № 2. 15 с. Chestnykh O.V., Grabovsky V.I., Zamolodchikov D.G. Soil Carbon in Forest Regions of the European-Ural Part of Russia. *Voprosy lesnoj nauki* = Forest Science Issues, 2020, vol. 3, no. 2. 15 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-2-1-15>

23. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. Reserves of Biological Carbon and Nitrogen in Soils of Russian Forest Fund. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2004, no. 4, pp. 30–42. (In Russ.).
24. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Carbon Budget of Russian Forests. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, no. 1, pp. 69–92. (In Russ.).
25. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
Schepaschenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. Organic Carbon Stocks in Soils of Russia. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2013, no. 2, pp. 123–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>
26. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Japan, Institute of Global Environmental Strategies, 2019. Available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html> (accessed 19.12.24).
27. Carbon Storage in Forests and Peatlands of Russia. Ed. by V.A. Alexeyev, R.A. Birdsey. General Technical Report NE-244. Radnor, PA, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 1998. 137 p.
28. Forest Ecosystem Health Indicators. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, FS-1151, 2020. 28 p.
29. Högberg P., Arnesson Ceder L., Astrup R., Binkley D., Bright R., Dalsgaard L., Egnell G., Filipchuk A., Genet H., Ilintsev A., Kurz W.A., Laganière J., Lemprière T., Lundblad M., Lundmark T., Mäkipää R., Malysheva N., Mohr C.W., Nordin A., Petersson H., Repo A., Schepaschenko D., Shvidenko A., Soegaard G., Kraxner F. *Sustainable Boreal Forest Management – Challenges and Opportunities for Climate Change Mitigation: Report from an Insight Process Conducted by a Team Appointed by the International Boreal Forest Research Association (IBFRA)*. Swedish Forest Agency, 2021. 57 p.
30. Luke Statistics Database. Available at: <https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/en/LUKE/> (accessed 19.12.24).
31. Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., McCallum I., Kraxner F. Soil Contribution to Carbon Budget of Russian Forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, vol. 200, pp. 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.017>
32. Multi-Source Inventory Methods for Quantifying Carbon Stocks and Stock Changes in European Forests. CarboInvent (Contract no. EVK2-2002-00157). Executive Summary, 2006. 53 p.
33. Stolbovoi V. Carbon in Russian Soils. *Climatic Change*, 2002, vol. 55, pp. 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:1020289403835>
34. Tomppo E., Gschwantner T., Lawrence M., McRoberts R.E. *National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting*. Heidelberg, Springer Science+Business Media B.V., 2010. 612 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3233-1>
35. Tomppo E., Heikkinen J., Henttonen H.M., Ihalainen A., Katila M., Mäkelä H., Tuomainen T., Vainikainen N. *Designing and Conducting a Forest Inventory – Case: 9th National Forest Inventory of Finland*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer Science+Business Media B.V., 2011. 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1652-0>
36. Xu L., He N.P., Yu G.R., Wen D., Gao Y., He H.L. Differences in Pedotransfer Functions of Bulk Density Lead to High Uncertainty in Soil Organic Carbon Estimation at Regional Scales: Evidence from Chinese Terrestrial Ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, vol. 120, iss. 8, pp. 1567–1575. <https://doi.org/10.1002/2015JG002929>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 630*161(551.509.68)
DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-98-114

Послепожарные изменения в светлохвойных лесах Башкирского заповедника

И.К. Гайсин, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [LQK-8865-2024](https://orcid.org/0009-0009-4591-3827),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4591-3827>

Башкирский государственный природный заповедник, ул. Карат, д. 2, с. Старосубхангулово, Республика Башкортостан, Россия, 453580; i.gaisin2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.06.23 / Одобрена после рецензирования 18.09.23 / Принята к печати 23.09.23

Аннотация. Оценка воздействия пожаров на лесные насаждения для получения информации о постпирогенном развитии компонентов леса в динамике становится все более актуальной в связи с возрастанием количества возгораний лесов и пройденной огнем лесной площади. Цель исследования – сбор фактических данных о процессах деструкции и начальной стадии восстановления компонентов леса в Башкирском заповеднике после крупного пожара 2020 г. в массиве Авдэктэ. Выполнен анализ послепожарных изменений светлохвойных насаждений на территории заповедника после низового пожара. Для участков, пройденных огнем различной интенсивности, приводятся данные по изменению показателей древостоев через 1 и 2 года после пожара, в т. ч. описана динамика подроста, подлеска, живого напочвенного покрова, лесной подстилки. Выявлена зависимость доли погибших деревьев от диаметра ствола, запаса образовавшейся захламленности и сухостоя. Наиболее сильно пострадали молодняк с диаметром ствола менее 16 см и старовозрастные деревья, имеющие пожарные подсушины или другие повреждения. Как самые сохранившиеся характеризуются средневозрастные деревья, которые обладают высоким потенциалом восстановления после ослабления под воздействием неблагоприятных факторов. По мультиспектральным снимкам Sentinel-2 проведена оценка повреждения древостоев через 1 и 2 года после пожара, выделены покрытые и непокрытые лесом участки. Покрытые лесом участки были разделены по степени гибели древостоев на 4 категории: 0–25; 26–50; 51–75 и более 75 %. Выявлены их площади в динамике через 1 и 2 года после пожара. На 2-й год после пожара площадь насаждения, где гибель деревьев составляет более 75 %, увеличилась с 619,7 до 1059,2 га и занимала более 1/3 территории, пройденной огнем. Данные инструментальных измерений и спутниковых снимков показали высокое сходство полученных результатов.

Ключевые слова: лесной пожар, интенсивность пожара, степень повреждения древостоя, мультиспектральные космоснимки, классификация древостоев, Башкирский заповедник

Благодарности: Сбор данных выполнен за счет госбюджетной тематики ФГБУ «Башкирский государственный заповедник» № 122122000046-6. Автор выражает благодарность Александру Михайловичу Волкову за помощь в обработке космических снимков.

Для цитирования: Гайсин И.К. Послепожарные изменения в светлохвойных лесах Башкирского заповедника // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 98–114. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-98-114>

Original article

Post-Fire Changes in Light Coniferous Forests of the Bashkir Nature Reserve

Ildar K. Gaisin, Leading Research Scientist; ResearcherID: [LOK-8865-2024](https://orcid.org/0009-0009-4591-3827),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4591-3827>

Bashkir State Nature Reserve, ul. Karat, 2, Starosubkhangulovo Village, Republic of Bashkortostan, 453580, Russian Federation; i.gaisin2012@yandex.ru

Received on June 26, 2023 / Approved after reviewing on September 18, 2023 / Accepted on September 23, 2023

Abstract. The assessment of the impact of fires on forest plantations in order to obtain information on the post-pyrogenic development of forest components over time is becoming increasingly relevant due to the increasing number of forest fires and the increase in the forest area affected by fire. The aim of the study has been to collect factual data on the processes of destruction and the initial stage of restoration of forest components in the Bashkir Nature Reserve after a major fire in 2020 in the Avdekte forestland. An analysis of post-fire changes in light coniferous plantations on the territory of the reserve after a ground fire has been carried out. For areas affected by fire of varying intensity, data are provided on changes in stand parameters 1 and 2 years after the fire, including a description of the dynamics of young growth, undergrowth, live ground cover and forest litter. The dependence of the proportion of dead trees on the stem diameter, the stock of the resulting litter and dead wood has been revealed. Young trees with a stem diameter of less than 16 cm and old-growth trees with fire scars or other damage have been the most severely affected. Medium-aged trees are characterized as the best preserved, which have a high potential for recovery after weakening under the influence of adverse factors. Using Sentinel-2 multispectral images, damage to stands 1 and 2 years after the fire has been assessed, and forested and unforested areas have been identified. The forested areas have been divided into 4 categories according to the degree of tree stand destruction: 0–25; 26–50; 51–75 and more than 75 %. Their areas have been identified in dynamics 1 and 2 years after the fire. In the 2nd year after the fire, the area of the plantation, where tree loss has been more than 75 %, has increased from 619.7 to 1059.2 ha and has been occupying more than 1/3 of the territory affected by fire. The data of instrumental measurements and satellite images have shown a high similarity of the results obtained.

Keywords: forest fire, fire intensity, degree of damage to the stand, multispectral satellite images, classification of stands, Bashkir Nature Reserve

Acknowledgements: Data collection was carried out at the expense of the state budget topic of the Federal State Budgetary Institution “Bashkir State Nature Reserve” no. 122122000046-6. The author expresses gratitude to Aleksandr Mikhailovich Volkov for assistance in processing satellite images.

For citation: Gaisin I.K. Post-Fire Changes in Light Coniferous Forests of the Bashkir Nature Reserve. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 98–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-98-114>

Введение

Природный пожар – это один из древнейших экологических факторов, определяющих динамику многих наземных экосистем, оказывая существенное воздействие на формирование состава сообществ [6, 12, 16, 18, 19].

Изучая массивы сосновых лесов, С.Н. Санников [17] пришел к выводу, что лесной пожар представляет собой сложнейший природный фактор, который действует внезапно, кратковременно и крайне интенсивно, вызывая глубокое и длительное прямое или косвенное преобразование всех взаимосвязанных компонентов биогеоценоза.

Многочисленные исследования показали значимость воздействия пожаров на древесную растительность. Это воздействие выражается при последующем естественном возобновлении, формировании структуры, в изменении динамики лесных экосистем и зависит от вида и интенсивности пожара. Однако в лесной экологии не сложилось целостного представления о многогранной биогеоценотической роли пожаров как глобального комплексного фактора, вызывающего одновременную трансформацию всех взаимосвязанных элементов экосистемы [20, 28].

Для различных районов произрастания светлохвойных лесов установлено, что процессы восстановительной сукцессии напрямую связаны с такими факторами, как интенсивность пожара, тип леса, возраст материнского древостоя, рельеф местности, экспозиция [25], эдафические и экологические факторы [2, 22, 23, 26], степень прогорания лесной подстилки [24].

Целью работы было исследование процессов деструкции и начальной стадии восстановления основных компонентов леса в светлохвойных насаждениях Башкирского заповедника в массиве Авдэктэ после крупного пожара 2020 г.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в Башкирском заповеднике в массиве Авдэктэ ($53^{\circ}15' - 53^{\circ}50'$ с. ш. $57^{\circ}36' - 58^{\circ}12'$ в. д.), где в 2020 г. прошел низовой лесной пожар с различной интенсивностью горения в разных локациях. Общая площадь пожара составляла 3130 га, из них 3042,1 га пришлось на территорию Башкирского заповедника, остальная часть пожара охватывала сопредельную территорию, на которой анализ не осуществлялся.

Район исследования расположен в юго-восточной части горно-лесного пояса Республики Башкортостан. Леса занимают около 80 % территории заповедника, в западной части представлены смешанными с преобладанием *Pinus sylvestris* L. и чистыми сосняками, а верхние части склонов южной экспозиции, вершины хребтов и увалов характеризуются превалированием *Larix archangelica* P. Lawson (*L. sukaczewii*) с примесью сосны. Мелколиственные леса, состоящие из *Betula pendula* L. и *Populus tremula* L. с участием сосны, произрастают преимущественно в восточной части заповедника.

Леса заповедника отличаются высокой горимостью. Следует отметить, что в пределах горного массива Южный Крака, расположенного в западной половине территории, лесов, ранее не подвергнувшихся воздействию пожаров, практически нет. Предопределяют большую пожарную опасность резко континентальный климат, засушливый, с недостаточным выпадением осадков весной и в 1-й половине лета, а также низкой относительной влажностью в вегетационный период. Усиливает пожарную опасность и значительно расчлененный горный характер рельефа с крутыми склонами. Леса Южного Крака в настоящее время представляют собой сложные комплексы, которые находятся на разных этапах послепожарной демутации. Для любого периода восстановительной сукцессии конкретных фитоценозов характерны различный состав и возраст древесно-кустарниковых растений и живого напочвенного покрова (ЖНП) [3, 26].

Исследование проводилось в 2021 и 2022 гг. на постоянных пробных площадях (ПП), заложенных на участках леса, подвергшихся пожару. Участки подбирались по космическим снимкам субметрового разрешения 2021 г. с последующим визуальным осмотром на месте и разделением на 4 категории по степени усыхания деревьев: слабая интенсивность – степень усыхания деревьев до 25 %; средняя – 26–50 %; сильная – 51–75 %; очень сильная – более 75 %. Устойчивость древостоев различных возрастных категорий к воздействию огня отличается [19], поэтому ПП располагались в древостоях, где средний возраст был в пределах одной возрастной категории – в приспевающих насаждениях.

ПП заложены размером 50×40 м. На них проводился пересчет всех деревьев с измерением диаметра на высоте 1,3 м, высоты стволов, оценкой жизненного состояния деревьев по 5-балльной системе [1] с некоторыми изменениями: 1 – мертвое; 2 – отмирающее; 3 – сильно поврежденное; 4 – поврежденное; 5 – здоровое дерево. Как мертвые учитывали только те экземпляры, которые были повреждены и погибли после пожара, старый сухостой в расчет не принимался. Оставшиеся после пожара жизнеспособный подрост и подлесок рассматривались отдельно. Проведено общее описание площадки, средней высоты нагара, захламленности в виде валежа, измерение толщины подстилки, если она отмечена, а также проективного покрытия и флористического богатства (ЖНП) с определением видов растений на учетных площадках, расположенных по диагонали ПП. Размеры учетных площадок составляли 2×2 м. Виды, которые невозможно было классифицировать на месте, гербаризовали. Учет захламленности выполнялся посредством измерения диаметров и длин всего валежа на ПП с последующим вычислением его запаса. К свежему относили валежник текущего года, остальное – к старому.

Общая площадь лесов по категориям интенсивности усыхания крон вычислена на основе спутниковых снимков Sentinel-2 за 2021 и 2022 гг. Для обработки данных дистанционного зондирования Земли была использована программа QGIS. Снимки подвергнуты атмосферной коррекции через модуль Semi-Automatic Classification Plugin v.7.10.11 программы QGIS v.3.26.2. Далее снимки автоматически кластеризовались методом ISODATA с созданием 10 классов и 10 итераций. Полученные растровые классы векторизовались с помощью стандартного инструмента конвертации растров программы QGIS. Информация об отдельных классах растительности сопоставлена с космоснимками высокого разрешения (0,5 м × 1 пикс.) для отнесения их к соответствующей категории лесных участков по степени повреждения древостоев, а также выделения редколесий и безлесных участков, подвергшихся пожару. Так как выделенных классов было больше, чем стадий повреждения древостоев, отдельные классы объединяли в соответствующую категорию.

Результаты исследования и их обсуждение

ПП № 1-21 заложена в квартале 108, в выделе 74, в средней части склона северо-восточной экспозиции 10–12°. Координаты – 53°21'25,17" с. ш. 57°51'24,02" в. д. Территория подверглась низовому пожару слабой интенсивности. На момент отбора участков усыхание древостоев составляло до 25 %. Характеристика древостоя до пожара и по прошествии 1 и 2 лет после него приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Таксационная характеристика древостоя пробной площади № 1-21
до и после пожара**
**The inventory characteristics of the stand of the sample plot no. 1-21
before and after the fire**

Таксационный показатель	До пожара	После пожара	
		2021 г.	2022 г.
Высота нагара, м	–	0,5–1,0 м	–
Состав древостоя	6С3Лц1Б	8С2Лц+Б	7С3Лц+Б
Средний возраст, лет	80	70	–
Густота, экз./га	–	640	602
Средний диаметр, см	22	20	18
Средняя высота, м	20	17	16
Площадь сечения стволов, м ² /га	–	27,5	24,3
Полнота	0,8	0,8	0,7
Запас стволовой древесины, м ³ /га	280	205	177
Средний балл жизненного состояния	–	2,8	2,4
Запас свежего сухостоя, м ³ /га	–	22	29
Запас старого сухостоя, м ³ /га	3	3	–

Состав подроста до пожара – 10Б, высота деревьев – 3 м, количество – 1 тыс. шт./га. Характеристика древостоя до пожара приводится по таксационным описаниям лесоустройства 2015 г. Данные таксационного описания представлены для всего выдела и могут отличаться от инструментальных измерений конкретной ПП.

В год после пожара наблюдалась свежая захламленность – 5–7 м³/га. Подрост, состоящий в основном из березы, подлесок из черемухи (*Prunus padus* L.), ракитника (*Chamaecytisus ruthenicus* Fisch. ex Wolf.) и шиповника майского (*Rosa majalis* Herrm) сильно пострадал, на ПП встречаются редкие экземпляры перечисленных видов. Проективное покрытие ЖНП равняется 40 % и включает иван-чай (*Chamaenerion angustifolium* L.) – 60 %; вейник тростниковидный (*Calamagrostis arundinacea* L.) – 10 %; жабрицу Крылова (*Seseli krylavii* V. Tichom.) – 5 %; бубенчик лилиелистный (*Adenophora liliifolia* L.) – 3 %; землянику (*Fragaria vesca* L.) – 1 %; мхи (sp.) – 5 %; в единичных экземплярах обнаружены фиалка холмовая (*Viola collina* Besser), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), смолка клейкая (*Viscaria vulgaris* Bernh.).

Через год после пожара отмечено ослабление всех деревьев, средний балл жизненного состояния – лишь 2,8. Наиболее пострадали молодняки, доля деревьев этой группы возраста, имеющих балл жизненного состояния 4 и выше, составляет только 4 %.

Подстилка прогорела частично, даже на участках, пройденных огнем, ее средняя толщина равняется 2–4 см. Зафиксированы обширные участки, где белый низовой пожар практически не затронул эту часть биогеоценоза.

Повторный учет в 2022 г. показал, что деревья, состояние которых характеризуется 2 баллами, погибли полностью. Отмирали деревья как с изначально низким баллом жизненного состояния, так и с высоким. Среднее жизненное состояние снизилось до 2,4 балла. Увеличилось количество захламленности.

Проективное покрытие ЖНП на 2-й год после пожара существенно увеличилось и составило 95 %. Видовое разнообразие практически не изменилось,

преобладали иван-чай – 90 %, вейник тростниковидный – 5 %, мхи – 2 %, остальные виды, отмеченные в предыдущем году, встречались единично. Обнаружено несколько экземпляров нового для территории вида – одуванчика обыкновенного (*Taraxacum officinale* L.).

ПП № 2-21 расположена в квартале 120, в выделе 16, в нижней части склона южной экспозиции с крутизной 15°. Координаты – 53°21'20,56" с. ш. 57°51'12,69" в. д. Данная ПП подверглась низовому пожару средней, местами сильной интенсивности. На момент отбора участков усыхание крон древостоев ПП составляло от 26 до 50 %. Захламленность – 15–20 м³/га. Подрост, состав которого до пожара был 7С3Лц, при высоте 1 м в количестве 0,5 тыс. шт./га, полностью погиб после пожара. В подлеске очень редко встречались ракитник, карагана кустарниковая (*Caragana frutex* L.) и шиповник, также отмечено 2 куста можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.). Захламленность свежая – 5 м³, старая – 10 м³.

Проективное покрытие ЖНП – 25 %. Он состоит из вейника тростниковидного – 30 %; псефеллуса сибирского (*Psephellus sibiricus* L.) – 15 %; жабрицы порезниковой (*Seseli libanotis* L.) – 15 %; тысячелистника обыкновенного – 10 %; иван-чая – 10 %; бубенчика лилиелистного – 5 %; земляники – 5 %; костяники (*Rubus saxatilis* L.) – 5 %; горца альпийского (*Aconogonon alpinum* Schur) – 5 %. Единично встречаются мхи (sp.), фиалка холмовая, кровохлебка лекарственная (*Sanguisorba officinalis* L.), смолка клейкая, герань лесная (*Geranium sylvaticum* L.), душица лекарственная (*Origanum vulgare* L.), ясcolка уральская (*Cerastium uralense* L.), сон-трава (*Pulsatilla patens* (L.)).

Лесная подстилка сгорела на 90 %, остались лишь отдельные неповрежденные островки средней мощностью 2–3 см.

Древостой значительно пострадал от воздействия огня, большая часть погибших и сильно ослабленных деревьев имела диаметр меньше 15 см (табл. 2). При этом самые крупные деревья также в большой степени пострадали, о чем свидетельствуют пожарные подсушины – следы прежних пожаров или другие повреждения на стволе.

Таблица 2

Таксационная характеристика древостоя пробной площади № 2-21 до и после пожара
The inventory characteristics of the stand of the sample plot no. 2-21 before and after the fire

Таксационный показатель	До пожара	После пожара	
		2021 г.	2022 г.
Высота нагара, м	–	1,0	–
Состав древостоя	8С2Лц+С+Лц	9С1Лц ед. Б	7С3Лц
Средний возраст, лет	80; 130	64	–
Густота, экз./га	–	835	675
Средний диаметр, см	24,0	19,4	20,9
Средняя высота, м	18,0	16,6	17,5
Площадь сечения стволов, м ² /га	–	29,6	25,04
Полнота	0,6	0,6	–
Запас стволовой древесины, м ³ /га	240,0	239,5	207,8
Средний балл жизненного состояния	–	2,7	2,3
Запас свежего сухостоя, м ³ /га	–	32	41
Запас старого сухостоя, м ³ /га	1	–	–

Повторный учет в 2022 г. показал, что деревья, имевшие низкое жизненное состояние, усохли. Количество захламленности увеличилось до 25 м³/га.

Проективное покрытие ЖНП составило 70 %. Преобладали иван-чай – 80 %, вейник тростниковидный – 15 %, горец альпийский – 5 %. Остальные ранее отмеченные на ПП виды встречены в единичных экземплярах, не обнаружена ясколка уральская.

ПП № 3-21 заложена в квартале 119, в выделе 42, в средней части склона западной экспозиции с крутизной 15°. Координаты – 53°21′06,19″ с. ш. 57°50′38,61″ в. д. По территории прошел низовой пожар сильной интенсивности. На момент отбора участков усыхание крон древостоев ПП было от 51 до 75 %, средняя высота нагара – 1,4 м. Захламленность свежая – 15 м³, старая – 2 м³. Валежник, который зафиксирован на ПП до пожара, полностью сторел.

Проективное покрытие ЖНП равнялось 25 %. Его формировали вейник тростниковидный – 30 %; иван-чай – 30 %; жабрица порезниковая – 15 %; чина весенняя (*Lathyrus vernus* L.) – 5 %; бубенчик лилиелистный – 5 %; земляника – 5 %; костяника – 5 %; черника (*Vaccinium myrtillus* L.) – 5 %. Единично встречались коротконожка перистая (*Brachypodium pinnatum* L.), орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* L.), фиалка горная (*Cyclamen europeum* L.), грушанка круглолистная (*Pyrola rotundifolia* L.), золотарник золотая розга (*Solidago virgaurea* L.), кровохлебка лекарственная, герань лесная, душица лекарственная и ясколка уральская.

Подрост и подлесок полностью погибли после пожара. Лесная подстилка сгорела, остались лишь отдельные пятна, толщиной до 1 см.

Древостой очень сильно пострадал от устойчивого низового пожара вне зависимости от возраста деревьев: если в 1-й год запас свежего сухостоя составил 82 м³/га, то на 2-й год – 102,1 м³/га. Более устойчивой оказалась лиственница, ее доля в составе древостоя увеличилась (табл. 3).

Таблица 3

Таксационная характеристика древостоя пробной площади № 3-21 до и после пожара
The inventory characteristics of the stand of the sample plot no. 3-21 before and after the fire

Таксационный показатель	До пожара	После пожара	
		2021 г.	2022 г.
Высота нагара, м	–	1,5	–
Состав древостоя	7С3Лц	6С4Лц ед. Б	5С5Лц
Средний возраст, лет	90,0	94,5	98,2
Густота, экз./га	–	580	395
Средний диаметр, см	24,0	21,5	22,8
Средняя высота, м	18,0	19,2	20,2
Площадь сечения стволов, м ² /га	–	22,6	17,0
Полнота	0,7	0,6	–
Запас стволовой древесины, м ³ /га	200,0	206,3	158,9
Средний балл жизненного состояния	–	2,1	1,9
Запас свежего сухостоя, м ³ /га	–	82,0	102,1
Запас старого сухостоя, м ³ /га	–	10	–

Повторный учет в 2022 г. показал снижение жизненного состояния деревьев, в живых осталось всего 395 шт./га – почти в 2 раза меньше, чем в предыдущем году. Их совокупное жизненное состояние было всего 1,9 балла. Абсолютное большинство деревьев значительно ослабли, практически нет деревьев с «хорошей» оценкой. Вследствие падения деревьев увеличилось количество захламленности, достигнув 50 м³/га.

Через 2 года после пожара проективное покрытие ЖНП составило 85 %. Преобладал иван-чай – 85 %; вейник тростниковидный – 10 %; бодяк полевой (*Cirsium arvense* L.) – 5 %. Остальные виды встречались в единичных экземплярах.

ПП № 4-21 заложена в квартале 107, выдел 95, в нижней части склона северо-западной экспозиции, крутизной 5°. Координаты – 53°21'33,93" с. ш. 57°50'55,13" в. д. ПП подверглась устойчивому низовому пожару сильной интенсивности. На момент отбора участков усыхание крон древостоев равнялось более 75 %. Подрост, подлесок, старый валежник, лесная подстилка и ЖНП полностью сгорели. Проективное покрытие ЖНП – всего 5 %, в его состав входят вейник тростниковидный – 70 %; злаки (sp.) – 30 %. Единично встречаются плаун булавовидный (*Lycopodium clavatum* L.), герань лесная и бубенчик лилиевый (табл. 4).

Таблица 4

Таксационная характеристика древостоя пробной площади № 4-21 до и после пожара

The inventory characteristics of the stand of the sample plot no. 4-21 before and after the fire

Таксационный показатель	До пожара	После пожара	
		2021 г.	2022 г.
Высота нагара, м	–	До 2,0	–
Состав древостоя	7СЗБ+С+Лц	10С+Лц	10С+Лц
Средний возраст, лет	80,0	87,1	–
Густота, экз./га	–	540	290
Средний диаметр, см	26,0	30,5	31,6
Средняя высота, м	22,0	25,5	26,4
Площадь сечения стволов, м ² /га	–	37,6	23,6
Полнота	0,8	0,8	–
Запас стволовой древесины, м ³ /га	350,0	381,9	275,7
Средний балл жизненного состояния	–	2,3	1,7
Запас свежего сухостоя, м ³ /га	–	70,8	200,0
Запас старого сухостоя, м ³ /га	–	6	–

На ПП наблюдается свежая захламленность – до 50 м³/га. Подрост и подлесок во время пожара сгорели полностью.

Древостой также сильно пострадал от воздействия огня: в 1-й год после пожара число живых деревьев составляло 540 шт./га и их среднее жизненное состояние было 2,3, на 2-й год осталось всего 290 шт./га со средним жизненным состоянием меньше 2, при этом удовлетворительное жизненное состояние имели 5–7 % деревьев. Это означает полную деградацию и дальнейшую гибель древостоя. Увеличилось количество захламленности, объем которой в 2022 г. – более 75 м³/га.

На 2-й год после пожара ПП полностью заросла иван-чаем высотой более 1,5 м, его проективное покрытие достигло 95 %, остальные ранее отмеченные виды встречены в единичных экземплярах. Надо сказать, что лиственница более устойчива по сравнению с сосной. На всех исследуемых ПП среди экземпляров этого вида с диаметром более 22 см погибших практически не отмечено.

На 2-й год после пожара всходов древесных растений на исследуемых ПП не обнаружено. Вне ПП зафиксировано небольшое количество всходов сосны и множество – березы.

Анализ погибших деревьев в зависимости от диаметра ствола с подразделением по ступеням толщины показал, что наиболее пострадали тонкомерные деревья, находящиеся в пределах ступени толщины 8 см. На участках, пройденных пожаром слабой интенсивности, в 1-й год погибло 77,6 на 2-й – уже 86,6 % (рис. 1) деревьев. По мере увеличения интенсивности огня доля погибших или сильно ослабленных деревьев для ступени толщины 8 см росла, достигая 100 %. Количество погибших деревьев по ступеням толщины обратно пропорционально диаметру ствола.

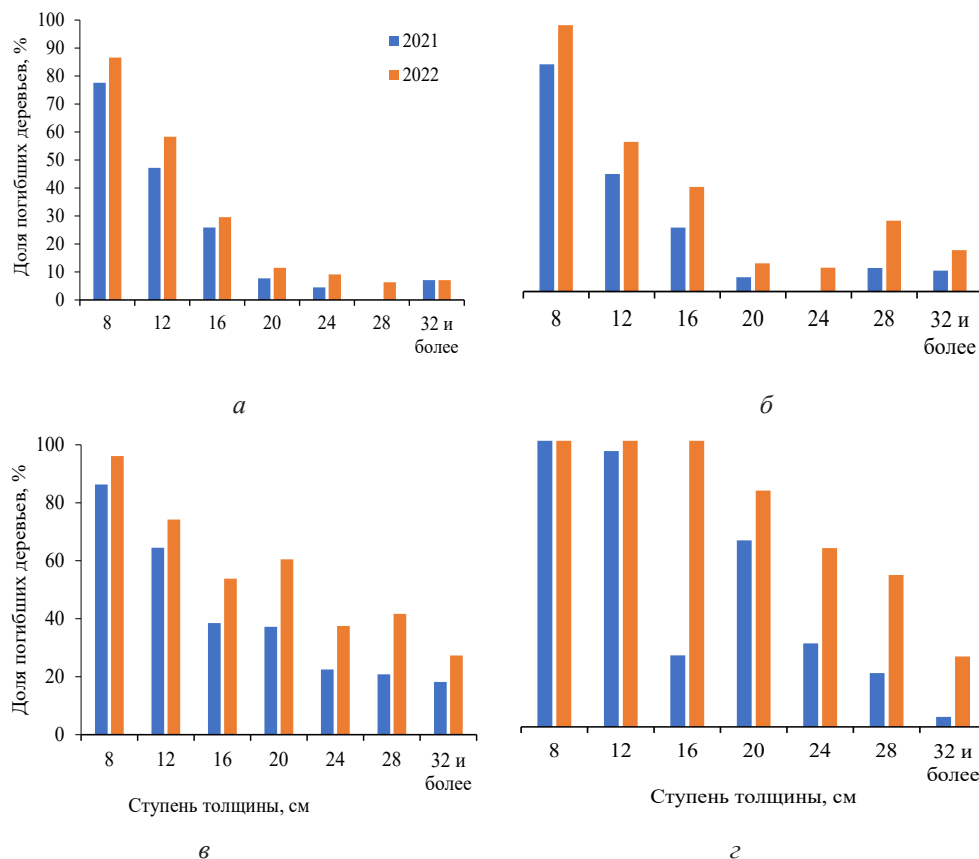


Рис. 1. Зависимость доли погибших деревьев от диаметров в 1-й и 2-й годы после пожара на ПП: а – № 1-21; б – № 2-21; в – № 3-21; г – № 4-21

Fig. 1. The dependence of the proportion of dead trees on diameter sizes in the 1st and 2nd years after the fire on the SP: а – no. 1-21; б – no. 2-21; в – no. 3-21; г – no. 4-21

Как видно из рис. 1, наименее пострадавшими являлись деревья в пределах ступени толщины 24 см, где сосредоточено большее число деревьев. Исключение составляет ПП № 4-21, на которой интенсивность горения была очень высокой. Полученный нами результат подтверждается литературными данными: средневозрастные и приспевающие деревья в отличие от молодняка имеют достаточно толстую кору, что позволяет им во время горения не получить необратимые повреждения, приводящие к гибели. В то же время они обладают максимальной устойчивостью и высоким потенциалом для восстановления после ослабления под воздействием неблагоприятных факторов, что нельзя сказать про старовозрастные деревья [7, 19].

Распределение деревьев на ПП по категориям жизненного состояния показало, что наибольшую долю на всех исследуемых участках занимает сухостой, которого на 2-й год становится предсказуемо больше (рис. 2).

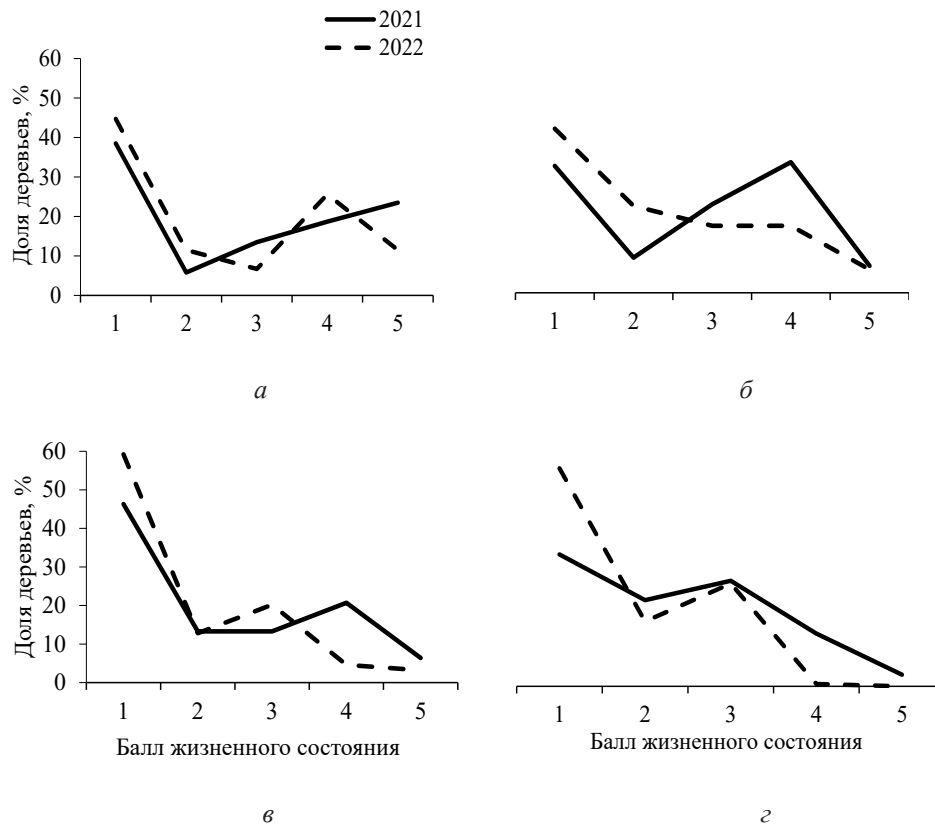


Рис. 2. Распределение деревьев по категориям жизненного состояния на ПП: а – № 1-21; б – № 2-22; в – № 3-21; з – № 4-21

Fig. 2. The distribution of trees by vitality categories on the SP: а – no. 1-21; б – no. 2-22; в – no. 3-21; з – no. 4-21

Увеличение числа деревьев с оценкой «3» на 2-й год после пожара на ПП № 3-21, 4-21 и «4» – на ПП № 1-21 объясняется снижением жизненного состояния поврежденных и здоровых деревьев. Категория здоровых принята условно, по визуальным признакам, т. к. даже после слабого беглого пожара почти не остается неповрежденных деревьев. На участках, пройденных

пожаром сильной интенсивности – ПП № 3-21 и 4-21, доля деревьев 4-й и 5-й категорий жизненного состояния на 2-й год после пожара составила менее 5 %.

Об устойчивости светлохвойных насаждений к воздействию низовых пожаров и их пирогенном происхождении написано немало работ [10, 14, 15, 19], в которых отмечается, что величина отпада зависит от интенсивности пожара, огнестойкости пород и их состояния [20, 21]. Степень повреждения древостоя и отпад определяются целым рядом факторов: засушливостью пожароопасного сезона, ветром, запасом напочвенных горючих материалов, возрастом, составом, диаметром, высотой древостоя и т. д. [11–13]. В значительной степени на этот процесс влияет климатический фактор, который обуславливает состояние насаждений [27]. Исследования показывают: если предшествующий пожару период был жарким, сухим, приводящим к влагодефициту стрессу и ослаблению насаждений, то воздействие пожара влечет за собой повышенный послепожарный отпад насаждений [23]. Важным является установление после пожара благоприятных условий, выпадение достаточного количества осадков, потому что в результате прохождения огня существенно изменяются физико-химические свойства, водно-воздушный и гидротермический режимы почв, что приводит к повышенному испарению, потере влаги, доступной растениям. Ослабленные воздействием пожаров насаждения становятся особенно уязвимыми к влиянию метеорологических условий [8]. В районе исследования предшествующий 2019 г. был чрезвычайно засушливым, а в 2020 г. уже с начала летних месяцев установилась погода с экстремально жаркими температурами и отсутствием осадков, повлекшая возникновение пожара высокой интенсивности. Последующий 2021 г. также был засушливым и жарким, следствием стала гибель выживших после огневого воздействия ослабленных деревьев. Этим объясняется то, что в 1-й год после пожара наиболее пострадали тонкомерные деревья, кора которых не могла защитить камбий от ожога. На 2-й год, кроме усыхающих тонкомерных деревьев, интенсивно гибли крупные экземпляры, в 1-й год имевшие хорошее жизненное состояние.

Наиболее устойчивыми являются спелые светлохвойные насаждения, ранее не подвергавшиеся пожару, с толщиной коры более 6,5 мм [7]. Леса района исследования ранее неоднократно испытывали пирогенное воздействие, о чем свидетельствуют послепожарные подсушины на стволах крупных деревьев. К сожалению, у нас нет достоверных данных о лесных пожарах, которые возникали на изучаемых участках. Многие деревья с подсушинами вывалились из-за полного прогорания основания ствола во время пожара, часть погибла на 2-й год. То же самое произошло с сухостойными деревьями: отмечен вывал практически всего сухостоя с последующим полным сгоранием.

Ослабленные насаждения поражаются энтомовыми вредителями, которые увеличивают гибель деревьев. Глазомерная оценка поврежденности древостоев энтомовыми вредителями показала, что уже в 1-й год после пожара произошло активное поражение до 30 % деревьев. На 2-й год пострадало от 30 до 70 %, на некоторых участках – до 95 % древостоя, в зависимости от его состава, возраста, условий местопрорастания и степени повреждения огнем. После крупных пожаров численность вредителей, по данным литературных источников, растет

в течение 3 лет, после чего постепенно убывает [9]. Гибель деревьев на 4-й год после воздействия низовых пожаров происходит прежде всего вследствие заселения ослабленных деревьев энтомоvoreдителями [5].

В 1-й год после пожара низкое проективное покрытие ЖНП объясняется тем, что лесные виды травянистых растений уязвимы перед огневым воздействием: при полном прогорании подстилки погибают даже устойчивые корневищные растения. Иван-чай не успевает полностью заселить оголившиеся от травостоя участки послепожарной территории. На 2-й год гарь зарастает им почти полностью [4, 14].

В 1-й год после пожара безлесные пространства занимали 6,5 %, редколесья – 16,6 %, на 2-й год площади безлесных участков и редколесий увеличились на 11,9 и 23,7 % соответственно (табл. 5). Такой рост ожидаем, т. к. деревья погибали, происходил вывал, сомкнутость крон и полнота снижались, ранее сомкнутые насаждения квалифицировались как редколесья, а редколесья становились безлесными. На покрытых лесом площадях в 1-й год преобладали участки с повреждением от 0 до 25 %, а также от 51 до 75 % деревьев. На 2-й год насаждения, погибшие более чем на 75 %, составляли более 1/3 лесов, подвергшихся воздействию пожара (рис. 3). Материалы, полученные на основе космоснимков и наших инструментальных замеров, согласуются: выявлены постпирогенная деградация и гибель насаждений в зависимости от интенсивности и характера пожара. Наиболее сильно пострадали насаждения на склонах южных экспозиций, на возвышенных частях рельефа и в сухих условиях местообитаний. Меньше всего – насаждения влажных типов местообитаний и в западной части горного массива Авдэктэ на пониженных частях рельефа. Это объясняется тем, что интенсивность огня во влажных условиях ниже, а на сухих южных склонах горючий материал разлагается меньше, накапливается в виде подстилки и за короткий срок достигает горючей зрелости, способствуя интенсивности пожара.

Таблица 5

Распределение пройденной пожаром территории Башкирского заповедника по категориям
The distribution of the territory of the Bashkir Nature Reserve affected by fire by categories

Категория	2021 г.		2022 г.	
	га	%	га	%
Безлесные пространства (горные степи, луга, пустыри)	198,3	6,5	362,1	11,9
Редколесья с сомкнутостью крон до 35 %	503,6	16,6	721,6	23,7
Насаждения, поврежденные на 0–25 %	683,3	22,5	498,8	16,4
На 26–50 %	349,6	11,5	153,0	5,0
На 51–75 %	687,5	22,6	247,3	8,1
Более чем на 75 %	619,7	20,4	1059,2	34,8
<i>Всего</i>	3042	100	3042	100

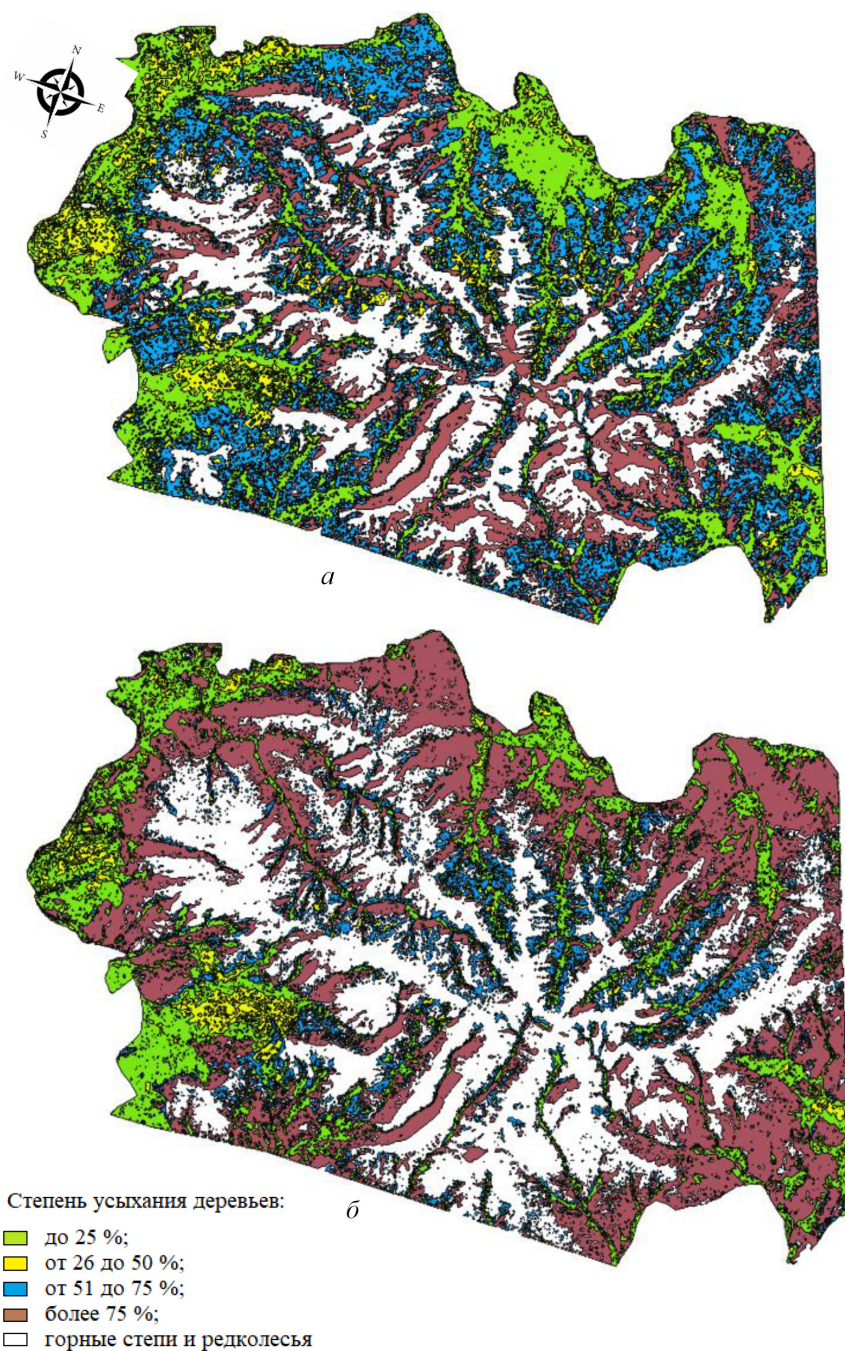


Рис. 3. Динамика насаждений по степени усыхания крон деревьев по данным мультиспектральных космоснимков Sentinel-2: *a* – 2021 г.; *б* – 2022 г.

Fig. 3. The dynamics of plantations by the degree of drying out of tree crowns according to Sentinel-2 multispectral satellite images: *a* – 2021; *б* – 2022

Выводы

1. После лесного пожара в Башкирском заповеднике в массиве Авдэктэ произошли существенные изменения всех компонентов леса в зависимости от интенсивности воздействия огня.

2. Наиболее динамичный компонент леса – травянистые растения – на 2-й год показал начало восстановительных процессов, наблюдалось интенсивное зарастание исследуемых участков иван-чаем, в проективном покрытии увеличилась доля вейника тростниковидного и других пионерных видов.

3. Древостой сильно пострадал от пожара, зафиксировано ослабление и отмирание древесных растений. Наиболее уязвлены молодняки, которые практически полностью погибли, вне зависимости от интенсивности огня. В насаждениях выросла доля деревьев с низким жизненным состоянием. На 2-й год отмечены вывал и накопление валежника, увеличение захламленности. Ослабленные деревья интенсивно заселялись энтомовыми вредителями, что усиливало негативное воздействие пожара.

4. На 2-й год после пожара соотношение площадей с различной степенью повреждения насаждений значительно изменилось. Сократились площади с наименьшим повреждением, а участки, где гибель деревьев составила более 75 %, заняли около 1/3 площади, пройденной огнем. Процесс гибели насаждений, на наш взгляд, будет продолжаться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

Alekseev V.A. Diagnostics of Tree Vitality and Stand Condition. *Lesovedenie = Forestry*, 1989, no. 4, pp. 51–57. (In Russ.).

Архипов Е.В., Залесов С.В. Отпад деревьев после низовых лесных пожаров в сосняках казахского мелкосопочника // Вестн. БГАУ. 2017. № 4. С. 90–97.

2. Arkhipov E., Zalesov S. Altrition of Trees after Ground Fires in Pine Forest of Kazakh Uplands. *Vestnik BGAU = Vestnik BSAU*, 2017, no. 4, pp. 90–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2017-44-4-90-97>

3. Атутова Ж.В., Воронай Н.Н., Шуклина Е.С. Ландшафтно-климатические особенности восстановительной динамики пирогенно трансформированных геосистем Тункинской котловины // Трансграничные территории Востока России: факторы, возможности и барьеры развития: материалы междунар. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Бурят. гос. ун-тет им. Доржи Банзарова, 2021. С. 160–165.

Atutova Zh.V., Voronay N.N., Shuklina E.S. Landscape-Climatic Features of the Restoration Dynamics of Pyrogenically Transformed Geosystems of the Tunka Depression. *Cross-Border Territories of the East of Russia: Factors, Opportunities and Barriers to Development: Proceedings of the international scientific and practical conference. Ulan-Ude, September 06–08, 2021. Ulan-Ude, Buryat State University named after Dorzhi Banzarov, 2021, pp. 160–165. (In Russ.).*

4. Бибеева А.Ю., Макаров А.А., Ноговицын В.Н. Послепожарное восстановление растительного покрова северной части Приморского хребта // Геогр. вестн. 2022. № 3(62). С. 6–18.

Bibaeva A.Yu., Makarov A.A., Nogovitsyn V.N. Post-Fire Restoration of Vegetation in the Northern Part of the Primorsky Range. *Geograficheskij vestnik = Geographical Bulletin*, 2022, no. 3(62), pp. 6–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-3-6-18>

5. Буряк Л.В., Зарубин Д.С., Кукавская Е.А., Каленская О.П. Оценка воздействия пожаров на древостои хвойных насаждений на территории заповедника «Центрально-сибирский» // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 3, № 2. С. 199–203.

Buryak L.V., Zarubin D.S., Kukavskaya E.A., Kalenskaya O.P. Assessment of the Impact of Fires on Coniferous Forest Stands in the Territory of the “Tsentral’nosibirskij” Nature Reserve. *Interexpo Geo-Sibir’ = Interexpo Geo-Siberia*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 199–203. (In Russ.).

6. Ваганов Е.А., Арбатская М.К., Шашкин А.В. История климата и частота пожаров в центральной части Красноярского края. 2. Дендрохронологический анализ связи изменчивости прироста деревьев, климата и частоты пожаров // Сиб. экол. журн. 1996. Т. 3, № 1. С. 19–28.

Vaganov E.A., Arbatskaya M.K., Shashkin A.V. The History of Climate and the Frequency of Fires in the Central Part of the Krasnoyarsk Territory. 2. Dendrochronological Analysis of the Relationship between Tree Growth Variability, Climate, and Fire Frequency. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*, 1996, vol. 3, no. 1, pp. 19–28. (In Russ.).

7. Гирс Г.И. Проблема устойчивости хвойных растений к воздействию высокой температуры // Горение и пожары в лесу. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1973. С. 197–206.

Girs G.I. The Problem of Resistance of Coniferous Plants to High Temperatures. *Gorenie i pozhary v lesu: Proceedings of the 1st All-Union Scientific and Technical Conference*. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood of the Siberian Branch of the USSR Academy of Science, 1973, pp. 197–206. (In Russ.).

8. Гирс Г.И. Физиология ослабленного дерева. Новосибирск: Наука, 1982. 255 с.

Girs G.I. *Physiology of a Weakened Tree*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 255 p. (In Russ.).

9. Жила С.В. Отпад деревьев под воздействием пожаров в сосняках нижнего Приангарья // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 2, № 3. С. 72–76.

Zhila S.V. Tree Loss due to Fires in Pine Forests of the Lower Angara Area. *Interexpo Geo-Sibir’ = Interexpo Geo-Siberia*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 72–76. (In Russ.).

10. Зленко Л.В., Ключников М.В. Влияние низовых пожаров на возобновление сосны в Приобском левобережном районе Алтая: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2013. 115 с.

Zlenko L.V., Klyuchnikov M.V. *The Impact of Ground Fires on Pine Regeneration in the Priobskij Left-Bank Area of Altai: Monograph*. Krasnoyarsk, Siberian State Technological University Publ., 2013. 115 p. (In Russ.).

11. Калинин К.К. Сукцессии растительного покрова на крупных гарях Среднего Заволжья // Вестн. Мар. гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2008. № 1. С. 19–28.

Kalinin K.K. Successions of Vegetation Cover on Large Fire-Sites of the Sredneye Zavolzhye Region. *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol’zovanie = Vestnik of Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management*, 2008, no. 1, pp. 19–28. (In Russ.).

12. Корчагин А.А. Условия возникновения пожаров и горимость лесов Европейского Севера // Уч. зап. ЛГУ. 1954. № 166. Сер. геогр. наук. Вып. 9. С. 182–322.

Korchagin A.A. Conditions of Fire Occurrence and Flammability of Forests of the European North. *Uchenye zapiski Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1954, № 166, series of geographical sciences, iss. 9, pp. 182–322. (In Russ.).

13. Леонова Н.А. Оценка сукцессионного состояния лесов в ландшафтах вторичных моренных равнин // University proceedings. Volga region. Natural sciences. 2021. № 4. С. 119–136.

Leonova N.A. Successional State of Forests in the Secondary Moraine Plains’ Landscapes. *University Proceedings. Volga Region. Natural Sciences*, 2021, no. 4, pp. 119–136. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21685/2307-9150-2021-4-11>

14. Матвеев А.М., Матвеева Т.А. Роль пожаров в подпологовом возобновлении сосны обыкновенной // Междунар. науч.-исследоват. журн. 2017. № 4-1(Ч. 1) (58). С. 140–143.

Matveev A.M., Matveeva T.A. The role of fires in the sub-ecological renewal of scots pine. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal, 2017, no. 4-1(part 1) (58), pp. 140–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.58.039>

15. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. М.; Л.: Гослестехиздат, 1948. 126 с.

Melekhov I.S. *The Impact of Fires on Forests*. Moscow, Leningrad, Goslестekhizdat Publ., 1948. 126 p. (In Russ.).

16. Санников С.Н. Лесные пожары как эволюционно-экологический фактор возобновления популяций сосны в Зауралье // Горение и пожары в лесу: материалы I Всесоюз. науч.-техн. совещ. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1973. С. 236–277.

Sannikov S.N. Forest Fires as an Evolutionary-Ecological Factor in the Restoration of Pine Populations in the Trans-Urals. *Gorenie i pozhary v lesu*: Proceedings of the 1st All-Union Scientific and Technical Conference. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood of the Siberian Branch of the USSR Academy of Science, 1973, pp. 236–277. (In Russ.).

17. Санников С.Н. Лесные пожары как фактор преобразования структуры, возобновления и эволюции биогеоценозов // Экология. 1981. № 6. С. 24–33.

Sannikov S.N. Forest Fires as a Factor in the Transformation of the Structure, Renewal and Evolution of Biogeocenoses. *Ekologiya*, 1981, no. 6, pp. 24–33. (In Russ.).

18. Санников С.Н. Эволюционная пироэкология: проблемы, принципы, гипотезы // Горение и пожары в лесу: тез. совещ. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1984. С. 35–37.

Sannikov S.N. Evolutionary Pyroecology: Problems, Principles, Hypotheses. *Gorenie i pozhary v lesu*: Meeting Abstracts. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood of the Siberian Branch of the USSR Academy of Science, 1984, pp. 35–37. (In Russ.).

19. Фуряев В.В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 251 с.

Furyaev V.V. *The Role of Fires in the Process of Forest Formation*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 251 p. (In Russ.).

20. Фуряев В.В., Заблоцкий В.И., Черных В.А. Пожароустойчивость сосновых лесов. Новосибирск: Наука, 2005. 160 с.

Furyaev V.V., Zablotskiy V.I., Chernykh V.A. Fire Resistance of Pine Forests. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 160 p. (In Russ.).

21. Фуряев В.В., Заблоцкий В.И., Черных В.А., Злобина Л.П. Устойчивость ленточных боров Алтая к воздействию пожаров // Лесоведение. 2009. № 3. С. 11–19.

Furyaev V.V., Zablotskiy V.I., Chernykh V.A., Zlobina L.P. Resistance of Altai Ribbon Forests to Fires. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2009, no. 3, pp. 11–19. (In Russ.).

22. Фуряев В.В., Цветков П.А., Фуряев И.В. Пожароустойчивость сосновых лесов Евразии в экстремальные пожароопасные сезоны // Хвойные бореал. зоны. 2017. Т. 35, № 3–4. С. 68–73.

Furyaev V.V., Tsvetkov P.A., Furyaev I.V. Flammability of Pine Forests of Eurasia in Extreme Fire Seasons. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2017, vol. 35, no. 3–4, pp. 68–73. (In Russ.).

23. Atutova Zh.V. Post-Fire Restoration of Pine Forests in the Badary Area, Tunkinskiy National Park, Russia. Nature Conservation Research. Заповедная наука, 2023, no. 8(2), pp. 22–32. <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.010>

24. Bellen van S., Garneau M., Bergeron Y. Impact of Climate Change on Forest Fire Severity and Consequences for Carbon Stocks in Boreal Forest Stands

of Quebec, Canada: a Synthesis. *Fire Ecology*, 2010, vol. 6, pp. 16–44. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0603016>

25. Hao B., Xu X., Wu F., Tan L. Long-Term Effects of Fire Severity and Climatic Factors on Post-Forest-Fire Vegetation Recovery. *Forests*, 2022, vol.13(6), art. no. 883. <https://doi.org/10.3390/f13060883>

26. Kwiatkowska-Falińska A.J. Post-Fire Succession on Abandoned Fields in Coniferous Forest Habitat (Nord-East Poland). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 2008, vol. 77, no. 3, pp. 245–254. <https://doi.org/10.5586/asbp.2008.031>

27. Menzel L., Yamkhin J., Yadamsuren G., Kopp B., Minderlein S., Munkhjargal M. Hydro-Ecological Landscape Research in the Khentii Mountains, Northern Mongolia. *Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia: Monograph in 5 Volumes*. Ed. By V.G. Sychev, L. Mueller. Vol. I. Landscapes in the 21st Century: Status, Analyses, Basic Processes and Research Concepts. Moscow, Publishing House of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Pryanishnikov Institute of Agrochemistry», 2018, pp. 148–152. <https://doi.org/10.25680/2850.2018.38.33.025>

28. Zhong C., Guo M., Zhou F., Li J., Yu F., Guo F., Li W. Forest Succession Trajectories after Fires in Valleys and on Slopes in the Greater Khingan Mountains, China. *Journal of Forestry Research*, 2023, vol. 34, pp. 623–640. <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01602-9>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 634.0.26:551.579

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-115-133

Водный режим защитных лесных полос в сухой степи Алтайского края

А.С. Манаенков¹✉, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [Y-8283-2018](https://orcid.org/0000-0002-2084-2147),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2084-2147>

П.М. Подгаецкая², *науч. сотр.*; *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0002-5709-7096>


¹Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; manaenkov1@yandex.ru✉

²Западно-Сибирская агролесомелиоративная станция – филиал ФНЦ агроэкологии РАН, ул. Лесная, д. 12, пос. Октябрьский, Кулундинский р-н, Алтайский край, Россия, 658915; agloswnialmi@mail.ru

Поступила в редакцию 19.07.23 / Одобрена после рецензирования 13.10.23 / Принята к печати 15.10.23

Аннотация. Юг Западной Сибири – крупный зерноводческий регион, где безопасное земледелие невозможно без защиты полей лесными полосами. Но с усилением засушливости территории снижается их долговечность, что сдерживает работы по облесению пахотных земель. Цель исследования – установить закономерности водного режима древостоев полезащитных лесных полос и обосновать их модели, наиболее подходящие для сухостепных районов. Изучена система средневозрастных полезащитных лесных полос из *Pinus sylvestris*, *Ulmus laevis*, *Betula pendula* высотой 7–10 м, *Ribes aureum* – 1,5–2,0 м на автоморфной каштановой почве. Установлено, что снегоотложение в полезащитных лесных полосах обусловлено многими факторами: количеством твердых осадков, ветровым и температурным режимом воздуха, ветропроницаемостью древостоя. Наслаиваясь, они нивелируют или усиливают общее воздействие на метелевый поток. Средняя высота и запас снега в зоне питания древостоя в основном зависят от количества твердых осадков, а в бескустарниковых полосах – повышаются также с густотой, высотой древостоя и шириной междурядий. В полезащитных лесных полосах с опушенными рядами кустарника запас снега уменьшается при увеличении числа и высоты рядов деревьев, ширины междурядий и расстояния между рядом кустарника и рядом деревьев. Эффективнее накапливают снег и работают «на себя» кустарниковые кулисы и плотные 1-рядные лесные полосы, а также 2–3-рядные древостои при наличии ряда кустарника с наветренной стороны. За ними по результативности удержания твердых осадков следуют 2–3-рядные бескустарниковые полезащитные лесные полосы с междурядьями 2,0–3,5 м и густотой древостоя 0,6–2,0 тыс. дер./га. Среди 2-рядных лесополос лучше накапливают снег более широкорядные и густые насаждения. Увеличение числа (выше 3) и густоты рядов деревьев снижает их наполнение твердыми осадками. В полезащитных лесных полосах из биогрупп деревьев эффективнее запасают снег умеренно густые (до 1000–1100 дер./га) биогруппы. Кустарниковые прерывистые кулисы образуют снежные холмики и могут использоваться как хорошее средство аккумуляции снега на межполосных полях. Стабильнее по годам весенние и летние запасы почвенной влаги формируются в бескустарниковых 2–3-рядных полезащитных лесных полосах с умеренно широкими междурядьями, а экономнее расходуют влагу умеренно густые насаждения сосны и березы.

© Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., 2025

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

Ключевые слова: каштановые почвы, полезащитные лесные полосы, снегоотложение, весенние запасы почвенной влаги, интенсивность использования влаги древостоем, Алтайский край

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания FNFE-2022-0001.

Для цитирования: Манаенков А.С., Подгаецкая П.М. Водный режим защитных лесных полос в сухой степи Алтайского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 115–133. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-115-133>

Original article

The Water Regime of Forest Shelterbelts in the Dry Steppe of the Altai Territory

Aleksandr S. Manaenkov¹✉, *Doctor of Agriculture; ResearcherID: [Y-8283-2018](https://orcid.org/0000-0002-2084-2147),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2084-2147>

Polina M. Podgaetskaya², *Research Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5709-7096>*

¹Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, prosp. Universitetskij, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; manaenkov1@yandex.ru✉

²West Siberian Agroforestry Ameliorative Station – Branch of the Federal Scientific Centre for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, ul. Lesnaya, 12, Oktyabrskij Settlement, Kulunda District, Altai Territory, 658915, Russian Federation; agloswnialmi@mail.ru

Received on July 19, 2023 / Approved after reviewing on October 13, 2023 / Accepted on October 15, 2023

Abstract. The south of Western Siberia is a large grain-growing region, where safe farming is impossible without protecting fields with forest belts. But as the aridity of the territory increases, their durability decreases, which hinders the afforestation of arable lands. The aim of this study has been to establish the patterns of the stands of forest shelterbelts and to substantiate their models that are most stable in dry-steppe areas. A system of middle-aged forest shelterbelts of *Pinus sylvestris*, *Ulmus laevis* and *Betula pendula* 7–10 m high and *Ribes aureum* 1.5–2.0 m high on automorphic chestnut soil has been studied. It has been established that snow deposition in the forest shelterbelts is determined by many factors: the amount of solid precipitation, wind and air temperature conditions, as well as wind permeability of the stand. By layering, they neutralize or enhance the overall effect on the snowstorm flow. The average snow depth and snow reserve in the stand nutrition zone mainly depend on the amount of solid precipitation, and in shrubless belts they also increase with density, stand height and row-spacing. In forest shelterbelts with edge rows of shrubs, the snow reserve decreases with an increase in the number and height of rows of trees, the width of the row-spacings and the distance between the row of shrubs and the row of trees. Shrubby curtains and dense 1-row forest belts, as well as 2–3-row stands in the presence of a row of shrubs on the windward side, accumulate snow more efficiently and work “for themselves”. According to the effectiveness of solid precipitation retention, they are followed by 2–3-row shrubless forest shelterbelts with row-spacing of 2.0–3.5 m and a stand density of 0.6–2.0 thousand trees/ha. Among the 2-row forest belts, more wide-row and dense plantations accumulate snow better. Increasing the number (above 3) and density of tree rows reduces their filling with solid precipitation. In forest shelterbelts, moderately dense (up to 1,000–1,100 trees/ha)



biogroups of trees accumulate snow more effectively. Shrubby intermittent curtains form snow mounds and can be used as a good means of accumulating snow on inter-belt fields. More stable spring and summer soil moisture reserves are formed over the years in shrubless 2–3-row shelterbelts with moderately wide row-spacings, while moderately dense stands of pine and birch use moisture more economically.

Keywords: chestnut soils, forest shelterbelts, snow deposition, spring soil moisture reserves, intensity of moisture use by the stand, the Altai Territory

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment FNFE-2022-0001.

For citation: Manaenkov A.S., Podgaetskaya P.M. The Water Regime of Forest Shelterbelts in the Dry Steppe of the Altai Territory. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 115–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-115-133>

Введение

Несмотря на непрерывное совершенствование систем земледелия и агротехнологий, в России и во многих странах мира ускоряются процессы деградации пахотных угодий. Особенно быстро они развиваются на территории засушливых регионов и могут приводить к масштабному опустыниванию земель [11, 12, 14, 20, 29, 30, 33]. В связи с этим не теряет актуальности концепция В.В. Докучаева о необходимости восстановления водного режима почв и грунтов степных районов, существовавшего в доземледельческий период, посредством защитного лесоразведения, строительства прудов, совершенствования приемов обработки почвы, установления географических норм соотношения площади пашни, лугов, леса, вод, посевов и т. п. [3, 8, 18, 19, 28, 31, 32].

В нашей стране эта концепция наиболее полно реализована в программе Особой экспедиции лесного департамента по испытанию и учету лесного и водного хозяйства в степях России (1892–1897) и в постановлении Совета министров СССР и ЦК ВКП(б) от 20 октября 1948 г. «О плане полезащитного лесоразведения, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах европейской части СССР». В комплексе предусмотренных ими согласованных облесительных и других мер большое внимание уделялось созданию на пахотных землях «поперек господствующих ветров» преимущественно полосных насаждений. В ряде аграрных районов страны оно стало неотъемлемой частью противоэрозионной системы земледелия [19], самостоятельным и основным видом лесной мелиорации – полезащитным лесоразведением [12, 22].

Постепенно полезащитное лесоразведение трансформировалось в создание узких (6–12...15 м) малорядных полезащитных лесных полос (ПЗЛП), в случае неблагоприятного водного режима ризосферы и плохой влагообеспеченности древостоя оказавшихся недостаточно устойчивыми и долговечными [4, 13–15, 20, 21, 26].

В публикациях [2, 5–7, 17] основное внимание уделяется оценке влияния ПЗЛП на снегоотложение, сток талых вод, микроклимат и водно-минеральный режим почвы на полях, урожайность и требуемые приемы возделывания культур. В меньшей мере изучен водный баланс самих насаждений. Вместе с тем считается, что их жизнеспособность в наибольшей степени зависит от количе-

ства выпадающих твердых осадков и объема аккумулируемого снега [1, 23–25, 27]. В наиболее засушливых районах на жизнеспособность заметно влияет увлажняющая эффективность осадков теплого периода, влажность почвы прилегающих полей, а также интенсивность десукции почвенной влаги древостоем, продолжительность вегетационного периода [15]. Из этого следует, что в одинаковых условиях потенциальная долговечность ПЗЛП является в основном результирующей строения насаждений, биологии древесных пород, системы земледелия, а повышения устойчивости и долговечности ПЗЛП можно достигать хозяйственными приемами. Это особенно актуально для молодых агролесомелиоративных районов, к которым относится и юг Западной Сибири [9].

Цель исследования – установить закономерности водного режима древостоев малорядных ПЗЛП и обосновать их модели, обеспечивающие устойчивость насаждения в сухостепных районах Алтайского края.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в системе 26–36-летних 2–4-рядных ПЗЛП из *Pinus sylvestris* L., *Ulmus laevis* Pall., *Betula pendula* Roth. средней высотой 7–10 м и *Ribes aureum* Pursh высотой 1,5–2,0 м в 2013–2020 гг. Территория расположена на плоской равнине Западно-Кулундинского сухостепного агролесомелиоративного района (Кулундинский район Алтайского края) с супесчано-легкосуглинистыми слабо комплексными автоморфными каштановыми почвами, промытыми от токсичных солей до глубины 1,0–1,2 м [21]. По данным Кулундинской метеостанции, за последние 50 лет среднегодовая температура воздуха региона составила 2,8 °С, января – –16,2, июля – 21,5 °С. Норма атмосферных осадков – 305 мм/год, испаряемости – 560–600 мм/год, продолжительности периода вегетации – 110–130 дней с суммой осадков 160–180 мм. За холодный период, в основном в виде снега, выпадает 28 % (86 мм) их годовой нормы. Различия в суммах осадков по годам достигают 260 %, за теплый период – 350 %, за холодный – 450 %. Весной–летом и ранней осенью бывают дни с низкой относительной влажностью воздуха и атмосферной засухой. Преобладают юго-западные ветра. Их средняя скорость зимой – 7,0–7,5 м/с, летом – 5–6 м/с. Число дней с сильными ветрами (более 15 м/с) в течение года – от 51 до 100.

В работе использованы положения [16]. Динамику снежного покрова и влажность почвогрунта изучали на полях с непрерывным циклом севооборота в основных лесных полосах, расположенных поперек преобладающих метелевых и дефляционноопасных ветров. Подбирали насаждения с типичным строением ветроломного профиля на участках с глубиной залегания грунтовой воды более 5 м. Характер снегоотложения наблюдали в конце зимы – перед снеготаянием. Высоту снежного покрова устанавливали снегомерной рейкой с точностью до 1 см на 3 параллельных трансектах. Измерения проводили в типичных точках рельефа и в середине лесной полосы, в 5 м от крайних рядов и поперек снежного шлейфа через 5–10 м, а в межшлейфовой зоне – через 25 м с последующим осреднением данных. Плотность и запасы воды в снеге определяли на основных участках шлейфа с помощью весового снегомера.

Влажность почвы фиксировали через каждые 10 см до глубины 120 см, в отдельных случаях – до 150 см, в 3-кратной повторности после схода снега,

в середине и в конце вегетации (апрель–май, июль, август–сентябрь) методом бурового зондирования и термостатно-весовой обработки образцов. Буровые скважины закладывали в середине лесной полосы, в 5 м от опушечных рядов (в зоне основного питания древостоя) и в поле вне шлейфа (контроль).

Статистический анализ данных полевых и лабораторных работ проводили с использованием программы Statgraphics 5/0 +/. Уровни связи изучаемых факторов оценивали по Б.А. Доспехову [10].

Результаты исследования и их обсуждение

За 7 лет наиболее малоснежной была зима 2018/2019 гидрологического года (г/г). Твердых осадков выпало около 90 % от нормы. Зимы 2013/2014, 2015/2016 и 2017/2018 г/г по запасам снега (116–107 %) оказались близки к средним. Наиболее частыми и обильными снегопадами отличалась зима 2016/2017 г/г, когда твердых осадков выпало в 2 раза больше нормы при относительно низкой температуре воздуха, и 2019/2020 г/г – осадки на 66 % превысили норму. Резкой засушливостью отличались теплые периоды 2014 и 2020 гг. (осадков меньше на 32 и 21 % соответственно). 2015 г. по сумме осадков лежал в границах нормы, а 2016 и 2018 гг., 2017 и 2019 гг. оказались на 16 и 30 % влажнее соответственно. Теплый период в 2018 г. был на 0,5 °С прохладнее, в остальные годы – на 0,5–2,5 °С теплее среднего. Среднегодовая температура воздуха в 2017/2018 г/г. – на 0,5 °С ниже, в остальные – на 0,1–3,2 °С выше нормы. Средняя скорость ветра зимой составила 5,2–5,4 м/с (на 2 м/с меньше нормы), максимальная – 21–23 м/с при небольшом количестве дней с сильными ветрами.

Анализ многочисленных кривых снегоотложения свидетельствует о том, что у одних и тех же моделей ПЗЛП в разные годы формировались схожие по форме снежные шлейфы. Различия заключались в их высоте и протяженности, а также размещении вершин относительно продольной оси лесной полосы. В метелистые зимы высота и длина шлейфа увеличивались, а вершина сугроба смещалась в подветренную сторону (табл. 1, см. рисунок).

Наиболее эффективно задерживал снег кустарник. Так, 3-рядные (3×1–2 м) кулисы смородины во все годы наблюдений почти полностью покрывались снегом с наибольшей высотой сугроба над средним рядом или с незначительным (5–8 м) смещением его вершины в подветренную сторону. Протяженность снежного шлейфа (высота снега ≥ 40 см) составляла 10–15 м в обе стороны от крайних рядов. Средняя высота снега в зоне водного питания кулисы (здесь и далее – в самой кулисе (полосе) и на 5-метровых закрайках) – 1,1–1,5 м.

Наличие ряда кустарника на расстоянии 1,2–1,5 м с наветренной стороны 1-рядной сосновой ПЗЛП, сформированной из смородины и сосны, приводило к образованию 2-вершинного сугроба. В средние по условиям погоды зимы вершина 60–90 см образовывалась с наветренной стороны – над рядом кустарника или в 5–6 м от него, вторая – с подветренной стороны на опушке или в 10–12 м от ряда деревьев. В метелистую зиму (2016/2017 г/г.) в такой ПЗЛП отмечен высокий (до 3 м) 1-вершинный сугроб на расстоянии 15–20 м от подветренного ряда. Он имел пологий наветренный и крутой подветренный склоны, протяженность шлейфовой зоны составила более 100 м. Средняя высота снежного шлейфа в зоне питания древостоя за годы наблюдения – 80–130 см.

Таблица 1

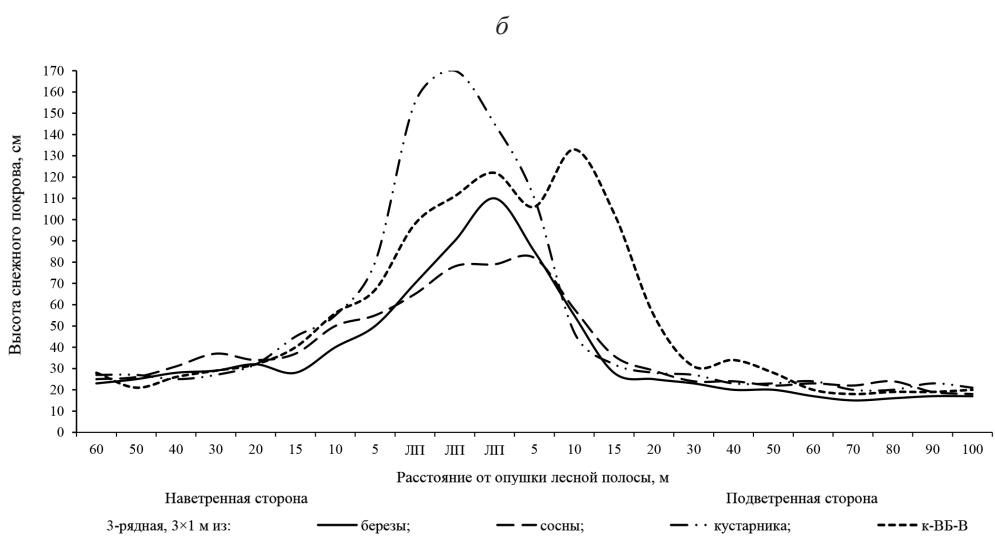
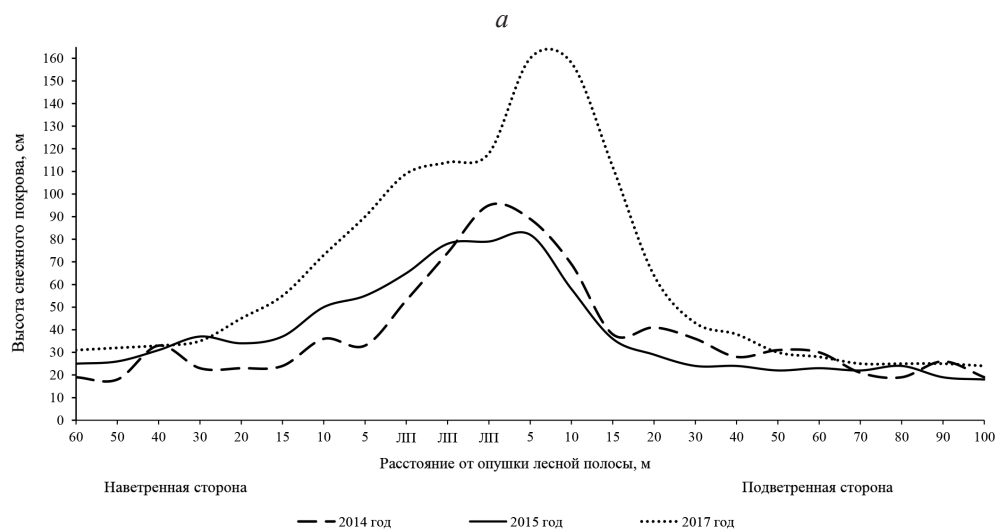
Высота снежного покрова и запасы воды в снеге в малорядных ПЗЛП на каштановой почве в Кулундинской степи
The snow depth and snow water reserves in low-row forest shelterbelts on chestnut soil in the Kulunda steppe

Модель ПЗЛП, схема посадки, м	Густота, тыс. дер./ га	Гидрологический год (Сумма осадков, мм, за холодный период)												Среднее			
		2013/2014 (99)		2014/2015 (113)		2015/2016 (100)		2016/2017 (241)		2018/2019 (78)		2019/2020 (148)		За период наблюдения		За 2014, 2015 и 2017 г.	
		Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв
В _п , через 1 м	3000	94	245	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
В–В, 1×2	630	–	86	224	47	122	121	321	–	–	–	–	–	85	221	–	–
В–В, 3,5×2,0	990	57	151	69	179	39	101	163	424	47	122	97	252	87	226	96	250
В–В, 6×2	315	–	–	–	–	–	–	108	281	–	–	–	–	–	–	–	–
В–В–В, 3×1	1940	48	129	59	153	–	–	128	333	51	133	83	216	78	202	82	213
К–ВБ–В, 3×1	1130	38	104	82	213	–	–	162	421	–	–	–	–	94	247	94	247
К–ВБ–ВБ–К, 1,5×1,0	1460	65	172	59	153	–	–	115	299	–	–	–	–	80	208	80	208
Б–Б, 1×2	280	–	–	–	–	–	–	120	312	–	–	–	–	–	–	–	–
Б–Б, 3,5×2,0	960	52	138	62	161	31	81	121	321	41	107	84	218	73	190	78	203
Б–Б–Б, 3×1	940	55	144	57	148	–	–	110	286	46	120	85	220	76	196	74	192
К–С, 1,5×1,0	1066	60	162	94	247	–	–	170	442	–	–	–	–	108	280	108	280
С–С, 1,2×0,5	1740	44	119	57	148	37	96	96	250	–	–	–	–	59	153	66	172
С–С, 1,2×1,0	980	46	125	61	159	33	86	70	182	–	–	–	–	53	138	59	153
С–С, 1,2×1,5	475	42	113	46	120	33	86	42	109	–	–	–	–	41	107	43	112
С–С, 3,5×1,0	1700	57	152	79	205	34	88	155	403	54	140	113	294	95	246	97	252

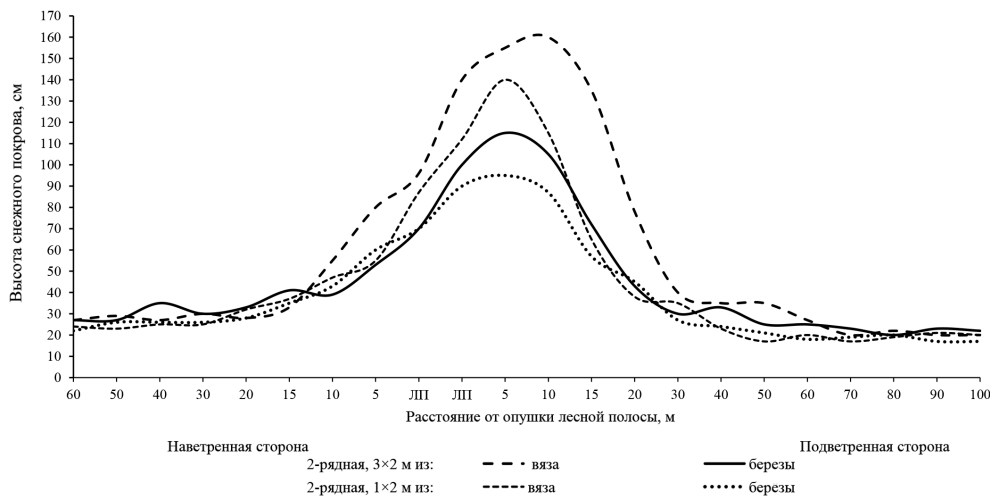
Окончание табл. 1

Модель ПЗЛП, схема посадки, м	Густота, тыс. дер./ га	Гидрологический год (Сумма осадков, мм, за холодный период)												Среднее				
		2013/2014 (99)		2014/2015 (113)		2015/2016 (100)		2016/2017 (241)		2018/2019 (78)		2019/2020 (148)		За период наблюдения		За 2014, 2015 и 2017 г.		
		Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	Сп	Зв	
С-С-С, 3,0×0,3	4775	-	-	59	153	37	96	125	325	-	-	-	-	-	74	192	-	-
С-С-С, 1,2×1,0	1470	41	101	74	192	43	112	130	338	-	-	-	-	-	72	187	82	213
С-С-С, 3×1	1800	59	153	56	146	-	-	120	312	-	-	82	214	79	208	76	202	-
С-С-С, 4,0×0,5	2860	46	126	65	169	41	101	102	265	-	-	-	-	64	166	71	185	-
С-С-С, 4×1	1710	44	119	64	166	38	104	89	231	-	-	-	-	59	153	66	172	-
С-С-С, 4,0×1,5	990	44	116	57	148	37	96	64	166	-	-	-	-	51	133	55	144	-
К-С-С-К, 1,2×0,4	2160	-	-	105	273	41	101	127	330	-	-	-	-	91	237	-	-	-
К-К-К, 3×1	2500	81	211	93	242	-	-	147	382	-	-	-	-	107	278	107	278	-
В-В-В-В, 2×7	1120	-	-	-	-	-	-	146	380	44	114	85	220	92	238	-	-	-
Б-Б-Б-Б, 2×7	370	-	-	-	-	-	-	107	278	35	91	73	190	72	147	-	-	-
С-С-С-С, 2×7	1060	54	144	60	156	36	94	123	320	50	130	90	234	65	169	79	205	-
В-С-С-В, 2×7	600	35	92	43	112	38	104	93	242	42	109	63	164	50	130	57	148	-

Примечание: В_н – вяз приземистый, В – вяз гладкий, Б – береза, С – сосна, К – кустарник (смородина); Сп и Зв – средняя высота снежного шлейфа в зоне питания древостоя в лесной полосе и на ее 5-метровых закрайках (см) и запас воды в снеге (мм) соответственно.



Окончание рисунка



2

Отложение снега под влиянием малорядных ПЗЛП на каштановой почве в Кулундинской степи: *a, б* – в разные годы в 2- и 3-рядных бескустарниковых из сосны; *в, г* – разных моделей в 2015 г.

The snow deposition under the influence of low-row forest shelterbelts on chestnut soil in the Kulunda steppe: *a, б* – in different years in 2- and 3-row shrubless pine forests; *в, г* – of different models in 2015

При увеличении ширины междурядий до 3 м и количества рядов деревьев характер снегоотложения существенно меняется. Так, в 3-рядной лесной полосе (смородина – вяз гладкий и береза – вяз гладкий) основная масса снега накапливалась на занятой древостоем площади и на расстоянии до 10 м от него в подветренную сторону с небольшой депрессией в рельефе сугроба в 5 м от крайнего подветренного ряда. Совокупная длина снежного шлейфа по обе стороны от ПЗЛП не превышала 40–45 м, а его средняя высота в зоне питания древостоя – 1 м.

В ПЗЛП «смородина–сосна–сосна–смородина» с междурядьями 1,2 м в средние по погодным условиям зимы основной объем снега аккумулировался на опушках и в рядах кустарника (высота вершин сугроба – 110–240 см) с глубоким (0,5–0,6 м) прогибом поверхности сугроба между рядами сосны. В такой же, но менее ветропроницаемой ПЗЛП из смородины и вяза с березой (смородина – вяз гладкий и береза – вяз гладкий и береза – смородина) 2-вершинный сугроб имел наибольшую высоту (115–130 см) в наветренном ряду деревьев и незначительную депрессию в рельефе склона между 2-м рядом деревьев и рядом кустарника. Вторая вершина образовывалась над подветренным рядом кустарника или на небольшом удалении от него со стороны поля. В метелистые зимы вершина с подветренной стороны становилась выше (до 160 см) вершины с наветренной части, а снежный шлейф смещался в направлении преобладающих ветров.

В средние по условиям погоды зимы с обеих сторон сосновой ПЗЛП протяженность снежного шлейфа составляла около 20 м, в метелистые – с наветренной стороны – 40 м, с подветренной – 60 м. У вязово-березовой ПЗЛП шлейф был укорочен соответственно по годам до 5 м с наветренной и до 15 м с подветренной стороны, до 20 м с обеих сторон. Его средняя мощность в зоне питания древостоя сосны составляла 90–150 см, вяза и березы – 80–115 см, максимальная – 140–160 см. По-видимому, на это расстояние оказывает влияние и высота деревьев. Так, у сосновых полос высотой 7, 9 и 10 м с размещением посадочных мест 1,2×0,5, 1,0, 1,5 м в 2016/2017 г/г образовались невысокие (60–70 см с наветренной и 80–90 см – с подветренной стороны) сугробы с депрессией поверхности снежного шлейфа в наветренном ряду (толщина снега – 50–60 см). Средняя высота снежного покрова в ПЗЛП и на опушках составила 45–65 см. Расстояние от ряда сосны до вершины подветренного сугроба – 10–15 м при уменьшении с увеличением высоты древостоя.

У 1-рядной плотно сомкнутой полосы из вяза приземистого высотой 6,2 м в близкую к средней по условиям погоды зиму также формировался высокий (около 2 м) сугроб с вершиной в 5 м от ее подветренной стороны и коротким шлейфом (до 20 м в наветренную и до 15 м – в подветренную сторону). Средняя высота снежного покрова в зоне питания древостоя достигала 1,5 м и более.

Особенностью 2-рядных бескустарниковых полос являлось относительно большое смещение вершины сугроба в подветренную сторону. С расширением междурядий увеличивалось их наполнение снегом и сокращалась протяженность снежного шлейфа на прилегающих полях. В целом для таких полос характерна его длина 10–20 м с наветренной и 20–30 м – с подветренной стороны, а в малоснежные маловетренные зимы она ограничивается 5-метровыми приопушечными зонами.

На отложение снега в бескустарниковых лесных полосах заметно влияет количество рядов. Так, в 3-рядных ПЗЛП с междурядьями 3 м основная масса снега аккумулировалась под пологом с вершиной сугроба в подветренном ряду или вблизи него. При расширении междурядий и повышении густоты рядов – ближе к наветренной опушке лесной полосы. Сближение рядов деревьев до 1,0–1,5 м нивелировало воздействие их количества. При этом больше снега оседало в 5–15 м с наветренной и подветренной сторон ПЗЛП, а его высота под древостоем уменьшалась на 20–30 см.

В целом средняя высота снега в зоне питания 3-рядных ПЗЛП меньше, чем в 2-рядных, а совокупная длина шлейфа (без учета ширины ПЗЛП) больше – 60–110 м.

Однако отметим, что на южном суглинистом черноземе Новосибирской области у очень плотных 3-рядных сосновых и лиственничных ПЗЛП (при схеме посадки 3,0×1,4 м) высотой 13–14 м в те же зимы основная масса снега оседала с наветренной (высота сугробов – 80–190 см) и подветренной (высота сугробов – 60–150 м) сторон на расстоянии 10–20 м от рядов деревьев. В самих ПЗЛП его было не более 30–50 см. В Кулундинской степи к схожему результату приводило удаление сучьев на деревьях до высоты ствола 1,5–2,0 м в густых

(выше 4 тыс. дер./га) насаждениях сосны. При этом снег не оседал в ПЗЛП, а откладывался на расстоянии 5–20 м в подветренной части, в поле.

В мелко-прерывистых 3-рядных ($3 \times 1-2$ м) и диагонально-групповых 4-рядных (2×7 м) ПЗЛП без кустарника снег лучше накапливался в умеренно ветропроницаемом древостое. Его высота под пологом биогрупп деревьев достигала 80–150 см, а в 3-рядных прерывистых кулисах из смородины – 220 см. Низкая и чрезмерная густота биогрупп вызывала отложение снега преимущественно на их подветренной стороне. При этом длина снежного шлейфа с наветренной стороны составляла 2,5–12,0 и 7–30 м, с подветренной – 10–20 и 12–40 м. У кустарниковых куртин соответственно – 12–30 и 10–40 м.

По результатам парного регрессионного анализа данных снегомерной съемки у сосновых ПЗЛП, наибольшая высота снежного покрова под древостоем в значительной степени ($r = 0,64$ и $0,63$) обусловлена количеством выпавшего снега, а в выборке, включающей ПЗЛП с кустарником, – слабо ($r = -0,16$) количеством рядов. Наличие кустарника фиксирует высоту снежного покрова на уровне собственной высоты.

Средняя высота снежного покрова в зоне питания древостоя имела еще более тесную связь ($r = 0,72$ и $0,77$) с количеством осадков, а в бескустарниковых моделях прямую слабую с густотой, высотой древостоя и шириной междурядий ($r = 0,23$, $0,18$ и $0,11$). Для 2-ярусных моделей ПЗЛП на высоту снега отрицательно влияло увеличение количества рядов, ширины междурядий и высоты древостоя.

Совместное воздействие погодных условий и строения ПЗЛП на максимальную высоту снега в ней составляло 42–44 %, и несколько больше при включении в анализ моделей с кустарником. Показатель уменьшался с увеличением количества рядов, и больше в бескустарниковых насаждениях. Только строением ПЗЛП высота сугроба обусловлена на 2,5–4,5 %, и больше при наличии кустарника. В ПЗЛП с кустарником прослеживается отрицательное влияние на уровень снега роста количества рядов и высоты древостоя. В бескустарниковых – исключительно числа рядов.

Средняя высота снежного покрова в зоне питания древесных растений всей совокупностью факторов детерминирована на 53–64 %, а лишь строением лесных полос – на 1,6–6,6 %, и больше в бескустарниковых насаждениях. В ПЗЛП с кустарником на нее отрицательно влияло увеличение как количества рядов, высоты древостоя, так и ширины междурядий.

Данные по весеннему запасу продуктивной влаги в слое почвогрунта 0–120 см (табл. 2) не дают однозначного ответа на вопрос о преимуществе того или иного строения ПЗЛП как по причине недостаточности информации, так и вследствие различий водоудерживающей способности этого слоя. Очевидно, что на относительно легких почвогрунтах влага просачивается глубже, но при этом также участвует в питании древостоя. Тем не менее можно заметить сравнительно высокую стабильность запаса влаги по годам в верхнем слое почвогрунта в бескустарниковых 2–3-рядных насаждениях с относительно широкими междурядьями.

Таблица 2

**Весенний запас продуктивной влаги в слое 0–120 см каштановой почвы в ПЗЛП
Кулундинской степи**

**The spring productive moisture reserve in a 0–120 cm layer of chestnut soil
in the forest shelterbelts of the Kulunda steppe**

Модель ПЗЛП, схема посадки, м	Год (Сумма осадков, мм, за холодный период)						
	2014 (99)	2015 (113)	2016 (100)	2017 (241)	2018 (93)	2019 (78)	2020 (148)
В–В, 3,5×2,0	74	–	–	–	–	–	–
В–В, 6×2	–	–	–	–	–	–	142
В–В–В, 3×1	–	–	–	–	–	106	
К–ВБ–ВБ, 3×1	–	81	59	–	–	–	56
К–ВБ–ВБ–К, 1,5×1,0	–	–	–	–	–	–	63
Б–Б, 3,5×2,0	70	–	–	–	–	–	–
Б–Б–Б, 3×1	–	–	–	–	–	65	122
К–С, 1,5×1,0	76	61	–	–	–	–	90
С–С, 3,5×1,0	64	97	99	105	51	–	73
С–С–С, 3,0×0,3		103	91	102	52	–	–
С–С–С, 3×1	61	103	–	–	60	60	103
К–С–С–К, 1,2×0,4	–	94	71	89	95	–	–
В–С–С–В, 2×7	–	–	–	–	–	–	91
Поле, посевы овса	35	53	95	103	97	35	–
Поле, травы/посевы многолетних трав	37	107	–	–	–	–	–

На межполосных полях большая динамичность весеннего запаса влаги объясняется как пестротой физических свойств почвы, так и спецификой использования полей в севообороте в предшествующем году.

Данные по эвапотранспирации ПЗЛП (табл. 3) свидетельствуют о том, что при одинаковых погодных условиях она зависит в основном от густоты насаждения и биологии древесной породы, определяющих эффективность жидких осадков и интенсивность десукции влаги древостоем. Наиболее экономно ее расходовали умеренно густые простые и комбинированные насаждения сосны и березы. При этом потребление влаги этими насаждениями мало отличалось от ее использования посевами полевых культур. На 10–115 мм больше на продуктивное испарение брали относительно густые ПЗЛП из сосны и вяза. При наличии доступной грунтовой воды интенсивность иссушения верхнего слоя почвогрунта древостоем снижалась.

Заключение

Таким образом, многолетние наблюдения в малорядных полезащитных лесных полосах на территории сухостепной подзоны Западной Сибири (Кулундинский район Алтайского края) свидетельствуют о большом разнообразии формы снежного шлейфа под древостоем, на закрайках и примыкающих полях. На этот процесс влияют такие факторы, как количество твердых осадков, ветровой и, по-видимому, температурный режимы воздуха, ветропроницаемость отдельных рядов и всего древостоя лесных полос, т. е. породный состав, количество, высота и густота рядов деревьев, ширина междурядий. При этом отдельные факторы, наслаиваясь, нивелируют или усиливают их общее воздействие на метелевый поток.

Наиболее эффективно накапливают снег и работают «на себя» кустарниковые кулисы и 1-рядные слабо продуваемые лесные полосы из плотнокронных пород. Покрываясь снегом, они играют роль полускрытых механических защит, увеличивая и стабилизируя высоту снега в межкулисном пространстве, и в последующем не препятствуют его переносу. Их следует использовать как долго действующее вспомогательное средство распределения снега на широких межполосных полях. Опушечные ряды кустарника уплотняют нижнюю часть комбинированных полезащитных лесных полос, резко усиливают их ветроломные свойства и меняют форму шлейфа снегоотложения. Наиболее эффективно задерживают снег и распределяют его на полях 2–3-рядные полосы, состоящие из ряда кустарника с наветренной стороны и 1–2 рядов деревьев. Однако высота снега в зоне питания древостоя в таких полосах сильнее зависит от ветропроницаемости рядов деревьев и количества твердых осадков. При высокой проницаемости рядов основная масса снега откладывается на подветренной опушке и в поле. По мере ее снижения сугроб перемещается в лесную полосу, на кустарниковый ряд, затем на наветренную опушку и в поле – за пределы зоны питания древостоя снеговой водой. Лучшей по надежности комбинированной моделью полезащитных лесных полос следует считать 3-рядные, состоящие из ряда кустарника и 2 умеренно ажурных рядов деревьев. Подеревное смешение вяза и березы повышает их ветропроницаемость и стимулирует отложение снега в лесных полосах.

Лесные полосы с рядом кустарника по обе стороны и умеренной проницаемостью ветроломного профиля тоже эффективно накапливают снег под пологом древостоя и на закрайках. Но плотные 2-ярусные опушки вызывают депрессию в снежном покрове во внутренней части лесных полос и в малоснежные зимы создают опасность аккумуляции снега только в рядах кустарника, что осложнит водное питание деревьев. Снижение высоты опушечного кустарника до 1,0–1,5 м при расстоянии между рядами деревьев 2,5–3,5 м будет способствовать повышению их влагообеспеченности.

Условия снегоотложения в 2–3-рядных бескустарниковых лесных полосах, особенно в 2-рядных, улучшаются при расширении междурядий до 3,0–3,5 м и более при густоте средневозрастного древостоя вяза до 600–800 дер./га, березы – 900–1000 дер./га, сосны – более 1000 дер./га. Чрезмерное уплотнение и рост в высоту древостоя этих полос приводят к перераспределению снежной массы в пользу опушек и прилегающего поля. При сокращении числа рядов с 3 до 2 следует расширять междурядья и повышать густоту

рядов. Однако в березовых и сосновых полезащитных лесных полосах с междурядьями шире 3,5 м, вязовых – шире 4 м увеличивается опасность зарастания почвы степными травами. Полезащитные лесные полосы из ильмовых и других плотнокронных пород следует создавать преимущественно 2-рядными, из березы, возможно, лиственницы – 3-рядными. 2- и 3-рядные лесные полосы из сосны эффективны при густоте рядов 1–2 тыс. дер./га. Низко опущенные кроны опушечных деревьев этой породы успешно выполняют функцию рядов кустарника и должны оставаться не нарушенными при выполнении агротехнических и лесоводственных работ.

В лесных полосах из биогрупп деревьев лучшие условия снегоотложения складываются в умеренно густых (1000–1100 дер./га) насаждениях сосны. В разреженных березовых и высоко сомкнутых вязовых – снег накапливается в основном с подветренной стороны биогрупп. Над прерывистыми рядами (куртинами) кустарника формируется цепочка снежных холмиков высотой 1,5–2,5 м с шириной основания в поперечном направлении 30–50 м.

Средняя высота снежного покрова и запас снега в зоне питания древостоя полезащитных лесных полос по большей части обусловлены количеством твердых осадков, а в бескустарниковых – также густотой, высотой древостоя и шириной междурядий. В лесных полосах с кустарником прослеживается отрицательное влияние на отложение снега увеличения количества рядов, высоты деревьев и ширины междурядий. Влияние на накопление снега всей совокупности факторов оценивается в 53–64 %, а только строения лесных полос – в 1,6–6,6 %, и больше в бескустарниковых моделях. Тем не менее при одинаковых погодных условиях изменение модели насаждений существенно отражается на снегоотложении в зоне питания древостоя и является надежным средством регулирования их влагообеспеченности.

Наиболее стабильные по годам весенние запасы почвенной влаги формируются и пополняются за счет дождей в бескустарниковых 2–3-рядных полезащитных лесных полосах с относительно широкими междурядьями, а экономнее всего они расходуются в умеренно густых простых и комбинированных насаждениях сосны и березы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Бабенко Д.К.* Научные основы ведения хозяйства в защитных лесных насаждениях. М.: Агропромиздат, 1985. 222 с.
Babenko D.K. *Scientific Principles of Management in Protective Forests Plantations*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 222 p. (In Russ.).
2. *Барбанов А.Т.* Особенности формирования современного весеннего склонового стока на пахотных землях Нижнего Поволжья // Вестн. МГУ. Сер. 5: Геогр. 2021. № 6. С. 77–86.
Barabanov A.T. Specific Features of Spring Slope Runoff Formation on Arable Lands of the Lower Volga River Region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2021, no. 6, pp. 77–86. (In Russ.).
3. *Баранов В.А.* Оптимизация агролесоландшафтов юго-востока европейской России (к 120-летию Докучаевской экспедиции) // Докучаевское наследие: итоги и перспективы развития научного земледелия в России: сб. науч. докл. Воронеж: Истоки, 2012. С. 238–242.

Baranov V.A. Optimization of Agroforest Landscapes in the South-East of European Russia (on the 120th anniversary of the Dokuchaev Expedition). *Dokuchaevskoe nasledie: itogi i perspektivy razvitiya nauchnogo zemledeliya v Rossii*: Collection of Scientific Reports. Voronezh, Istoki Publ., 2012, pp. 238–242. (In Russ.).

4. Беляев А.И., Манаенков А.С., Пугачёва А.М., Подгаецкая П.М., Петров В.Н. Создание долговечных поlezashchitnykh лесных полос на юге Западной Сибири: метод. рекомендации. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2022. 36 с.

Belyaev A.I., Manaenkov A.S., Pugacheva A.M., Podgaetskays P.M., Petrov V.N. *Creation of Long-Lasting Forest Shelterbelts in the South of Western Siberia*: Methodological Recommendations. Volgograd, Federal Scientific Centre for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, 2022. 36 p. (In Russ.).

5. Васильев М.Е. О теории снегодинамики в системе лесная полоса – защищенное поле // Пути повышения эффективности поlezashchitnogo лесоразведения. М.: Колос, 1979. С. 34–49.

Vasiliev M.E. On the Theory of Snow Dynamics in the Forest Belt – Protected Field System. *Puti povysheniya effektivnosti polezashchitnogo lesorazvedeniya*. Moscow, Kolos Publ., 1979, pp. 34–49. (In Russ.).

6. Васильев Ю.И., Степанов А.М. Поlezashchitnoe лесоразведение // Агроресомелиорация. 5-е изд., перераб. и доп. / под ред. академиков РАСХН А.Л. Иванова и К.Н. Кулика; Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. С. 323–415.

Vasiliev Yu.I., Stepanov A.M. Protective Afforestation. *Agroforestry*: 5th ed., revised and enlarged. Ed. by Academicians of the Russian Academy of Agricultural Sciences A.L. Ivanov and K.N. Kulik. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 2006, pp. 323–415. (In Russ.).

7. Гаршинёв Е.А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: Экспериментальная оценка и проектирование. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2002. 220 с.

Garshinyov E.A. Erosion-Hydrological Process and Forest Reclamation: Experimental Evaluation and Design. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 2002. 220 p. (In Russ.).

8. Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь // Избр. соч. М.: Сельхозиздат, 1954. С. 450–512.

Dokuchaev V.V. Our Steppes Before and Now. *Selected Works*. Moscow, Selkhozizdat Publ., 1954, pp. 450–512. (In Russ.).

9. Долгилевич М.О., Бялый А.М., Савельев Л.С., Лазарев М.М., Савичев В.Д. Состояние лесных полос и пути их улучшения в сухой степи Алтайского края // Пути повышения эффективности поlezashchitnogo лесоразведения. М.: Колос, 1979. С. 177–198.

Dolgilevich M.O., Byalyj A.M., Savel'ev L.S., Lazarev M.M., Savichev V.D. The Condition of Forest Belts and Ways to Improve Them in the Dry Steppe of the Altai Territory. *Puti povysheniya effektivnosti polezashchitnogo lesorazvedeniya*. Moscow, Kolos Publ., 1979, pp. 177–198. (In Russ.).

10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (С основами статистической обработки результатов исследований). 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1979. 416 с.

Dospekhov B.A. *Field Experiment Methodology: (With the Basics of Statistical Processing of Research Results)*. 4th ed, revised and enlarged. Moscow, Kolos Publ., 1979. 416 p. (In Russ.).

11. Кулик К.Н., Габунцина Э.Б., Кружилин И.П., Куст Г.С., Манаенков А.С., Павловский Е.С., Савостьянов В.К., Тулухонов А.К., Петров В.И. Опустынивание и комплексная мелиорация агроландшафтов засушливой зоны. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2007. 86 с.

Kulik K.N., Gabunshchina E.B., Kruzhilin I.P., Kust G.S., Manaenkov A.S., Pavlovsky E.S., Savost'yanov V.K., Tulukhonov A.K., Petrov V.I. *Desertification and Complex Reclamation*

of Agricultural Landscapes in Arid Zones. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 2007. 86 p. (In Russ.).

12. Кулик К.Н., Свинцов И.П., Барабанов А.Т., Манаенков А.С., Васильев Ю.И., Жданов Ю.М., Зыков И.Г., Кулик Н.Ф., Крючков С.Н., Маланина З.И., Павловский Е.С., Петров В.И., Рулев А.С., Степанов А.М., Семенютин А.В., Сухоруких Ю.И., Шульга В.Д., Юфев В.Г. Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации до 2020: моногр. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 34 с.

Kulik K.N., Svintsov I.P., Barabanov A.T., Manaenkov A.S., Vasiliev Yu.I., Zhdanov Yu.M., Zykov I.G., Kulik N.F., Kryuchkov S.N., Malanina Z.I., Pavlovsky E.S., Petrov V.I., Rulev A.S., Stepanov A.M., Semenyutina A.V., Sukhorukikh Yu.I., Shulga V.D., Yuferev V.G. *Strategy for the Development of Protective Afforestation in the Russian Federation until 2020*: Monograph. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 2010. 34 p. (In Russ.).

13. Манаенков А.С. Развитие основ степного и защитного лесоразведения: теоретические, прикладные аспекты и задачи в современных условиях // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 2(30). С. 5–23.

Manaenkov A.S. The Formation of Steppe and Protective Afforestation Basement: Theoretical and Applied Aspects in the Contemporary Context. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Forest. Ecology. Nature Management", 2016, no. 2(30), pp. 5–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2016.2.5>

14. Манаенков А.С., Абакумова Л.И., Подгаецкая П.М. Повышение долговечности полезащитных лесных полос на юге Западной Сибири // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. Вып. 2(34). С. 41–47.

Manaenkov A.S., Abakumova L.I., Podgaetskaya P.M. Increasing the Durability of Forest Shelterbelts in the South of Western Siberia. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzhskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education, 2014, iss. 2(34), pp. 41–47. (In Russ.).

15. Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Подгаецкий М.Е. Особенности роста малорядных лесных полос на каштановых почвах // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 5.: Геогр. 2022. № 3. С. 134–142.

Manaenkov A.S., Podgaetskaya P.M., Podgaetsky M.E. Specific Features of the Growth of Few-Row Forest Belts on Chestnut Soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2022, no. 3, pp. 134–142. (In Russ.).

16. Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов / под ред. Е.С. Павловского, М.О. Долгилевича. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.

Methodology of Systematic Research of Forest-Agrarian Landscapes. Ed. by E.S. Pavlovsky, M.O. Dolgilevich. Moscow, Lenin All-Union Academy of Agricultural Sciences, 1985. 112 p. (In Russ.).

17. Муканов Б.М. Влияние системы лесных полос на гидрологический режим почвогрунтов // Кулундинская степь: прошлое, настоящее, будущее: материалы науч.-практ. конф. / под ред. Е.Г. Парамонова. Алт. ун-т, 2003. С. 209–216.

Mukanov B.M. The Influence of the Forest Belt System on the Hydrological Regime of Soils. *Kulunda Steppe: Past, Present, Future*: Proceedings of the Scientific and Practical Conference. Ed. by E.G. Paramonov. Altai University Publ., 2003, pp. 209–216. (In Russ.).

18. Наумов В.Д. О защитном лесоразведении // Докучаевское наследие: итоги и перспективы развития научного земледелия в России: сб. науч. докл. Воронеж: Истоки, 2012. С. 222–226.

Naumov V.D. About Protective Afforestation. *Dokuchaevskoe nasledie: itogi i perspektivy razvitiya nauchnogo zemledeliya v Rossii*: Collection of Scientific Reports. Voronezh, Istoki Publ., 2012, pp. 222–226. (In Russ.).

19. Павловский Е.С., Гаршинев Е.А., Барабанов А.Т. О научном развитии докучаевской концепции экологически сбалансированных агроландшафтов // Защитное лесоразведение: история, достижения, перспективы. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1998. Вып. 1(108). С. 96–105.

Pavlovsky E.S., Garshinev E.A., Barabanov A.T. On the Scientific Development of the Dokuchaev Concept of Ecologically Balanced Agricultural Landscapes. *Protective Afforestation: History, Achievements, Prospects*. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 1998, no 1(108), pp. 96–105. (In Russ.).

20. Парамонов Е.Г. Современное состояние полезащитного лесоразведения в Алтайском крае // Степной бюл. 2014. № 40. С. 34–39.

Paramonov E.G. *Modern Status of Conservation Afforestation in Altai Krai*. *Stepnoj bulluten'* = Steppe Bulletin, 2014, no. 40, pp. 34–39. (In Russ.).

21. Парамонов Е.Г., Ишутин Я.Н., Симоненко А.П. Кулундинская степь: проблемы опустынивания. Барнаул: Алтайск. ун-т, 2003. 137 с.

Paramonov E.G., Ishutin Ya.N., Simonenko A.P. Kulunda Steppe: Problems of Desertification. Barnaul, Altai University Publ., 2003. 137 p. (In Russ.).

22. Полезащитное лесоразведение – фактор повышения продуктивности пашни и интенсификации земледелия // Агролесомелиорат. наука в XX в. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2001. С. 67–113.

Protective Afforestation – a Factor in Increasing Arable Land Productivity and Intensification of Agriculture. *Agroforestry Science in the XX century*. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 2001, pp. 67–113. (In Russ.).

23. Портянко А.Ф. Водный баланс полезащитных лесных полос и их устойчивость // Пути повышения эффективности полезащитного лесоразведения. М.: Колос, 1979. С. 207–220.

Portyanko A.F. Water Balance of Forest Shelterbelts and Their Stability. *Puti povysheniya effektivnosti polezashchitnogo lesorazvedeniya*. Moscow, Kolos Publ., 1979, pp. 207–220. (In Russ.).

24. Портянко А.Ф. Научные основы создания устойчивых долговечных полезащитных лесополос в Западной Сибири // Агролесомелиорация и интенсификация земледелия по природным зонам страны: сб. науч. тр. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1987. Вып. 1(90). С. 31–46.

Portyanko A.F. Scientific Foundations for the Creation of Sustainable Long-Lasting Protective Forest Belts in Western Siberia. *Agrolesomeliorsiya i intensifikatsiya zemledeliya po prirodnym zonam strany*: Collection of Scientific Works. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 1987, iss. 1(90), pp. 31–46. (In Russ.).

25. Симоненко А.П., Шошин В.И. Водообеспеченность полезащитных лесных полос и их гидрологическая роль в сухой степи Западной Сибири // Агролесомелиорация в Западной Сибири: сб. науч. тр. Новосибирск, 1982. С. 11–24.

Simonenko A.P., Shoshin V.I. Water Availability of Protective Forest Belts and Their Hydrological Role in the Dry Steppe of Western Siberia. *Agrolesomeliorsiya v Zapadnoj Sibiri*: Collection of Scientific Papers. Novosibirsk, 1982, pp. 11–24. (In Russ.).

26. Степанов А.М. Современное состояние полезащитного лесоразведения // Защитное лесоразведение: история, достижения, перспективы. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1998. Вып. 1(108). С. 116–125.

Stepanov A.M. The Current State of Protective Afforestation. *Protective Afforestation: History, Achievements, Prospects*. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 1998, iss. 1(108), pp. 116–125. (In Russ.).

27. Торохтун И.М. Совершенствование технологии выращивания полезащитных лесных полос в различных почвенно-климатических условиях // Агролесомелиорация и интенсификация земледелия по природным зонам страны: сб. науч. тр. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1987. Вып. 1(90). С. 20–31.

Torokhtun I.M. Improving the Technology of Cultivation of Forest Shelterbelts in Various Soil and Climatic Conditions. *Agrosomelioratsiya i intensifikatsiya zemledeliya po prirodnym zonam strany*: Collection of Scientific Works. Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Melioration Publ., 1987, iss. 1(90), pp. 20–31. (In Russ.).

28. Труды экспедиции, снаряженной Лесным департаментом, под руководством проф. Докучаева // Избр. соч. М.: Сельхозиздат, 1954. С. 514–542.

The Works of the Expedition, Equipped by the Forestry Department, under the Leadership of Prof. Dokuchaev. *Selected Works*. Moscow, Selkhozizdat Publ., 1954, pp. 514–542. (In Russ.).

29. Fahad S., Saud S., Nawaz T., Gu L., Ahmad M., Zhou R. *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*. Springer Nature Switzerland, 2020. 654 p.

30. Li R., Napier T.L., El-Swaify S.A., Sabir M., Rienzi E. *Global Degradation of Soil and Water Resources*. Springer Singapore, 2022. 564 p.

31. Mueller L., Sychev V.G., Dronin N.M., Eulenstein F. Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. Springer Cham, 2021. 734 p.

32. Naorem A., Machiwal D. Enhancing Resilience of Dryland Agriculture Under Changing Climate: Interdisciplinary and Convergence Approaches. Springer Singapore, 2023. 716 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-9159-2>

33. Sivanpillai R. Chapter 1 – Introduction to Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters. *Biological and Environmental Hazards, Risks and Disasters*, 2016, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394847-2.00001-2>

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

Научная статья

УДК 630*2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-134-144

Состав фитоценозов на лесных гарях Бурятии

Б.Б. Климов¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1298-4432>

А.В. Грязькин¹, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [C-6699-2018](https://orcid.org/0000-0002-7901-2180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

О.И. Гаврилова², д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

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

²Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185960; ogavril@mail.ru

Поступила в редакцию 10.08.23 / Одобрена после рецензирования 07.11.23 / Принята к печати 09.11.23

Аннотация. Представлены данные по видовому составу и обилию древесной и кустарниковой растительности на гарях южного Забайкалья. Объект исследования – гари большой площади в лесном фонде Хоринского лесничества Республики Бурятия. Фитоценозы расположены на песчаных почвах, на разных элементах рельефа на высоте от 676 до 845 м над ур. м. – от подножий до вершин пологих холмов. Учет растительности всех компонентов леса проводили по свободным маршрутным ходам на круговых учетных площадках радиусом 1,785 м. Примыкая друг к другу, они образовывали учетную ленту. На каждом опытном участке закладывали не менее 30 учетных площадок. Установлено, что состав растительности и долевое участие видов на объектах исследования различаются. На гарях 14–15-летней давности отмечено наличие 15–18 видов растений в составе живого напочвенного покрова. Максимальное проективное покрытие – более 5 % имеют 6 видов: *Vaccinium vitis-idaea* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Carex pseudocyperus* L., *Avenella flexuosa* (L.) Drejer, *Lichenes* sp. L., *Bryidae* sp. Engl. В составе подлеска выявлено 6 видов, преобладают *Sorbus aucuparia* subsp. *Sibirica* (Hedl.) Krylov, *Viburnum burejaeticum* Regel & Herder и *Juniperus sibirica* Burgsd. Показано, что размах варьирования численности подлеска по объектам исследования составил 190–673 экз./га. Подрост сформирован сосной обыкновенной в количестве от 27 до 62 экз./га. Указано, что основной причиной небольшой численности самосева сосны являлись экстремальные температуры поверхности почвы в летний период. Зафиксирована максимальная температура 63 °C на минерализованной части почвы, что вызывает денатурацию белка в эндосперме и потерю всхожести семян. Акцентируется внимание на большой доле минерализованной поверхности как следствия ветровой и водной эрозии. На отдельных опытных участках площадь минерализованной поверхности превысила 18 %. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании лесовосстановительных мероприятий, при геоботанических исследованиях и в учебном процессе.

Ключевые слова: гарь, подрост, подлесок, живой напочвенный покров, видовой состав, Республика Бурятия



Для цитирования: Климов Б.Б., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Состав фитоценозов на лесных гарях Бурятии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 134–144. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-134-144>

Original article

The Composition of Phytocenoses in Forest Burnt Areas of Buryatia

Boris B. Klimov¹, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1298-4432>

Anatoly V. Gryazkin¹, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [C-6699-2018](https://orcid.org/0000-0002-7901-2180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

Olga I. Gavrilova², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

¹Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskii per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; klimov@mail.ru, lesovod@bk.ru

²Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185960, Russian Federation; ogavril@mail.ru

Received on August 10, 2023 / Approved after reviewing on November 7, 2023 / Accepted on November 9, 2023

Abstract. Data on the species composition and abundance of woody and shrubby vegetation in burnt areas of southern Transbaikalia are presented. The object of the study is a large burnt area in the forest fund of the Khorinsky forestry of the Republic of Buryatia. Phytocenoses are located on sandy soils, on various relief elements at an altitude of 676 to 845 m above sea level – from the foothills to the tops of gentle hills. The vegetation of all forest components has been recorded along free routes on circular survey sites with a radius of 1,785 m. Adjacent to each other, they have formed a counting tape. At least 30 survey plots have been established at each experimental site. It has been established that the vegetation composition and the proportion of species at the study sites differ. In the burnt areas 14–15 years old, the presence of 15–18 plant species in the living ground cover has been noted. The maximum projective cover – more than 5 % – is found in 6 species: *Vaccinium vitis-idaea* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Carex pseudocyperus* L., *Avenella flexuosa* (L.) Drejer, *Lichenes* sp. L., *Bryidae* sp. Engl. 6 species have been identified in the undergrowth, the most prevalent being *Sorbus aucuparia* subsp. *Sibirica* (Hedl.) Krylov, *Viburnum burejaeticum* Regel & Herder and *Juniperus sibirica* Burgsd. It has been shown that the range of variation in the number of undergrowth by study objects has been 190–673 pcs/ha. The young growth is formed by Scots pine in numbers ranging from 27 to 62 pcs/ha. It has been indicated that the main reason for the small number of self-seeding pine trees has been the extreme soil surface temperatures in the summer. The maximum temperature of 63 °C has been recorded in the mineralized part of the soil, which causes protein denaturation in the endosperm and loss of seed germination. Emphasis is placed on the large proportion of the mineralized surface as a consequence of wind and water erosion. In some experimental sites, the mineralized surface area has exceeded 18 %. The results obtained can be used in the design of reforestation measures, in geobotanical research and in the educational process.

Keywords: burnt area, young growth, undergrowth, living ground cover, species composition, the Republic of Buryatia

For citation: Klimov B.B., Gryazkin A.V., Gavrilova O.I. The Composition of Phytocenoses in Forest Burnt Areas of Buryatia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 134–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-134-144>

Введение

Леса сибирских регионов регулярно подвергаются воздействию лесных пожаров, охватывающих площади, нередко достигающие 1 тыс. га. Последствия стихийного бедствия такого рода – существенное изменение развития лесных фитоценозов на многие годы и даже десятилетия. Не во всех случаях этот процесс завершается обновлением первоначального состава и структуры лесного биогеоценоза. Первый этап сукцессионных процессов на гарях и горельниках – восстановление травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. На более поздних этапах появляются отдельные виды подлеска и подроста. На бедных сухих почвах чаще всего восстанавливается древостой исходного состава. Как правило, это сосновое насаждение лишайникового или верескового типа леса [1–8, 11–13, 16–20].

Сосна обыкновенная – одна из самых распространенных лесобразующих пород в лесном фонде РФ. На территории Республики Бурятия, по данным Лесного плана, утвержденного правительством Республики Бурятия от 28 декабря 2018 г. № 763, сосняки занимают 3399,7 тыс. га. В Хоринском лесничестве, где были проведены геоботанические исследования, преобладают сосновые леса. Основная часть лесных массивов произрастает по склонам разных экспозиций на песчаных сухих бедных почвах. Горимость лесов на территории указанного лесничества высокая, средний класс пожарной опасности в целом составляет 1,1, что указано в Лесохозяйственном регламенте Хоринского лесничества (приказ республиканского агентства Республики Бурятия от 28 сентября 2017 г. № 788).

На сухих бедных почвах древостой сосны обычно имеют невысокие густоту и сомкнутость крон. Растительность нижних ярусов не отличается большим разнообразием. Подрост сосны представлен единичными особями, а подлесок – несколькими видами кустарников. В составе живого напочвенного покрова доминируют ксерофиты и гелиофиты [2, 4, 6, 10, 14–20].

Целью проведенного исследования было изучение флористического состава видов живого напочвенного покрова, подроста и подлеска на разных участках рельефа гарей сосновых насаждений Республики Бурятия.

Объекты и методы исследования

Опытные объекты – гарь большой площади в Хоринском лесничестве Республики Бурятия (рис. 1).



Рис. 1. Гарь площадью более 100 га после пожара 2014 г.

Fig. 1. The burnt area of more than 100 ha after a fire in 2014

Опытные участки располагались на разных элементах рельефа: подножье склона, середина склона северо-восточной экспозиции и вершина холма (табл. 1). Почвы песчаные, сухие.

Таблица 1

Общая характеристика исследованных гарей
The general characteristics of the studied burnt areas

Номер гари	Пожар, год	Высота над уровнем моря, м	Часть склона	Уклон, ...°
1	2015	676	Подножие	2–4
2	2015	724	Средняя	6
3	2015	775		7
4	2014	845	Верхняя	10

Рельеф местности холмистый, характеризуется сильной расчлененностью. По дну многочисленных распадков протекает большое количество постоянных и временных водотоков. В летний период почти все мелкие ручейки пересыхают.

Строение песчаной почвы на объектах исследования практически не отличается. Органогенные горизонты представлены слабо разложившимся опадом. Гумусовый горизонт отсутствует. Ниже по профилю – озовые пески.

Учетные площадки закладывали по свободному ходу в количестве от 30 до 70 в зависимости от площади опытного участка и протяженности элемента рельефа. Маршрутный ход в каждом случае пролегал от подножия склона к вершине. Учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова проводили на круговых учетных площадках по 10 м² [6, 9]. Для подроста и подлеска устанавливали численность, структуру по высоте и состоянию. Для живого напочвенного покрова определены видовой состав, встречаемость и проективное покрытие [10]. Одновременно с этим на всех опытных участках фиксировали долю минерализованной поверхности почвы.

Измерения температуры воздуха и почвы, освещенности, учет видовой состава растительности – одноразовые. Это связано с большой удаленностью гарей от дорожной сети и населенных пунктов.

Результаты исследования и их обсуждение

Склоны любой экспозиции и крутизны подвержены сильной ветровой и водной эрозии. Эти процессы приводят к разрушительным последствиям на гарях, когда в период весеннего снеготаяния и ливневых дождей смываются не только верхние горизонты почвы, но и более глубокие слои с образованием вымоин и даже оврагов глубиной до 5–8 м (рис. 2).

Рис. 2. Вымоины на гари, образовавшиеся из-за водной эрозии

Fig. 2. The wash-outs on the burnt areas caused by water erosion



В отдельных случаях мелкие вымоины заваливают несгоревшими остатками древесины для предупреждения глубокой эрозии. Мероприятия такого рода единичны, из-за большой трудоемкости и отсутствия необходимого количества древесных отходов.

Древостой на опытных участках представлен сильно обгоревшими стволами одиночных деревьев сосны (от 24 до 80 экз./га). Небольшая часть (чаще всего прикомлевая) обгоревших упавших стволов находится на поверхности почвы. Вдоль остатков стволов образуются затененные полосы, на которых могут прорасти семена не только травянистых, но и древесных растений (рис. 3 и 4).



Рис. 3. Единичный подрост сосны на парцеллах со злаковой растительностью и детритом на гари

Fig. 3. A single pine young growth on parcels with cereal vegetation and detritus on the burnt area



Рис. 4. Единичные экземпляры растительности на гари в затененных местах

Fig. 4. Single specimens of vegetation on the burnt area in a shaded site

Растительность на объектах исследования характеризовалась небольшим видовым разнообразием. В первую очередь это касалось подроста, который представлен только единичными экземплярами самосева сосны обыкновенной. Его численность по гарям № 1–4 варьировала от 27 до 62 экз./га. Такие небольшие значения связаны с экстремально высокими температурами на поверхности почвы – в отдельных случаях она достигает 63 °С, – что вызывает денатурацию белков в эндосперме семени и приводит к полной потере всхожести. Самосев в таких условиях появился только там, где семена были затенены упавшими стволами деревьев или травянистой растительностью.

В составе подлеска выявлено 6 видов. Преобладали калина бурятская *Viburnum burejaeticum* Regel & Herder и рябина сибирская *Sorbus aucuparia* subsp. *Sibirica* (Hedl.) Krylov. От общей численности подлеска на них приходилось 43–68 % (табл. 2).

Подлесок представлен 6 видами кустарниковых пород. Его общая численность на объектах исследования составляла от 277 до 673 экз./га. Чаще всего встречались калина бурятская, рябина сибирская и шиповник иглистый. Состав данного яруса по изученным гарям почти одинаковый. Различна доля участия каждого вида в составе подлеска.

Таблица 2

Видовой состав и численность подроста и подлеска на исследованных гарях, экз./га
The species composition and abundance of young growth and undergrowth
on the studied burnt areas, pcs/ha

Вид	Номер гари			
	1	2	3	4
Акация желтая <i>Caragana arborescens</i> Lam.	48	–	–	–
Калина бурятская <i>Viburnum burejaeticum</i> Regel & Herder	206	125	109	54
Курильский чай <i>Dasiphora fruticosa</i> (L.) O.Schwarz	62	–	–	–
Можжевельник сибирский <i>Juniperus sibirica</i> Burgsd.	93	31	31	55
Рябина сибирская <i>Sorbus aucuparia</i> subsp. <i>Sibirica</i> (Hedl.) Krylov	121	78	69	27
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L.	62	31	31	27
Шиповник иглистый <i>Rosa acicularis</i> Lindl.	142	65	68	54
<i>Общая численность подроста</i>	62	31	31	27
<i>Общая численность подлеска</i>	673	299	277	190

У подножия склона (гарь № 1) состав подлеска следующий: 34К22 Шип19Ряб10Мож8Ч_к7Ак_ж. На средней части склона: гарь № 2 – 37Шип34К26Ряб3Мож, гарь № 3 – 45К24Шип19Ряб12Мож.

На вершине холма (гарь № 4) численность подроста и подлеска, а также количество формирующих их видов значительно меньше, чем на гарях № 1–3. По сравнению с гарью № 1 количество подроста здесь меньше на 43 %, а подлеска – на 32 %. Состав подлеска на гари № 4: 29Мож28К28Шип15Ряб.

Видовой состав растительности на гарях зависел от режима освещенности, температуры воздуха и почвы (табл. 3). Кроме этого, на видовой состав, численность и состояние растительности негативное воздействие оказывал дефицит влаги.

Таблица 3

Температурный режим воздуха и почвы на исследованных гарях
в августе, °С

The temperature regime of air and soil on the studied burnt areas in August, °С

Место измерения температуры	Номер гари			
	1	2	3	4
На высоте 1,3 м	11,1	12,0	10,1	16,0
На поверхности почвы	12,4	14,2	11,0	19,3
На глубине 5 см	12,1	13,1	10,3	18,1
На глубине 10 см	10,2	12,4	10,2	18,0

Освещенность на гари зависела от экспозиции склона и элементов рельефа. Измерения освещенности и температуры проводились с 12 до 13 ч дня. Освещенность на склонах северной экспозиции была минимальной – 42–48 тыс. люкс, а на склонах южной экспозиции максимальной – 64–72 тыс. люкс.

На количество видов в составе живого напочвенного покрова влияли элементы рельефа. Минимальное количество видов в составе живого напочвенного покрова и подлеска наблюдалось в средней части склона, что связано с последствиями интенсивной ветровой и водной эрозии (табл. 4).

Таблица 4

**Встречаемость и проективное покрытие видов
в составе живого напочвенного покрова на исследованных гарях, %**
**The occurrence and projective cover of species
in the composition of living ground cover on the studied burnt areas, %**

Вид	Номер гари			
	1	2	3	4
Брусника обыкновенная <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	32/5,8	40/2,0	70/4,3	–
Вейник лесной <i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth	7/8,3	10/0,5	37/3,5	93/27,3
Гвоздика травянка <i>Dianthus deltoides</i> L.	10/0,5	10/0,5	–	–
Горошек амурский <i>Vicia amurensis</i> Oett.	–	–	–	3/0,1
Горошек двулетний <i>Vicia biennis</i> L.	3/0,1	33/2,7	50/2,2	–
Горошек малопарный <i>Vicia paucijuga</i> (Trautv.) B.Fedtsch.	3/0,1	–	3/0,1	–
Горошек укороченный <i>Vicia abbreviata</i> Fisch. ex Spreng.	13/0,7	63/3,2	20/1,0	81/4,6
Зеленые мхи <i>Bryidae</i> sp. Engl.	–	–	45/9,3	27/1,9
Иван-чай <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	7/2,3	23/1,2	37/2,8	46/2,3
Клевер средний <i>Trifolium medium</i> L.,	13/0,7	23/1,2	50/2,8	–
Кошачья лапка двудомная <i>Antennaria dioica</i> (L.) Gaertn.	3/0,1	–	13/0,7	2/0,1
Кровохлебка лекарственная <i>Sanguisorba officinalis</i> L.	3/0,1	–	–	2/0,1
Кульбаба щетинистая <i>Leontodon hispidus</i> L.	3/0,1	–	3/0,1	–
Купена многоцветковая <i>Polygonatum multiflorum</i> (L.) All.	7/0,3	7/0,3	–	2/0,1
Купырь лесной <i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.,	9/0,8	–	3/0,1	–
Лапчатка прямостоячая <i>Potentilla erecta</i> (L.) Raeusch.	–	–	33/3,4	43/2,4
Лишайники <i>Lichenes</i> sp. L.	9/1,2	18/3,0	18/5,1	36/6,0
Луговик извилистый <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	30/2,5	73/3,0	53/5,5	32/1,9
Мак голостебельный <i>Papaver nudicaule</i> L.	–	8/0,8	7/0,3	–
Осока ложносытевая <i>Carex pseudocyperus</i> L.	83/12,0	93/10,3	70/4,8	93/14,3
Полынь Гмелина <i>Artemisia gmelinii</i> Webb ex Stechmann	5/0,8	8/0,4	11/0,5	–

Окончание табл. 4

Вид	Номер гари			
	1	2	3	4
Полынь полевая <i>Artemisia campestris</i> L.	12/0,1	8/0,1	8/0,4	–
Полынь горькая <i>Artemisia absinthium</i> L.	37/1,8	63/3,8	40/2,0	2/0,1
Сон-трава, прострел раскрытый <i>Pulsatilla patens</i> (L.) Mill.	23/1,2	10/0,5	60/3,4	18/0,9
Тысячелистник обыкновенный <i>Achillea millefolium</i> L.	59/1,9	–	–	–
Хвощ полевой <i>Equisetum arvense</i> L.	12/2,4	–	3/0,1	–
Ястребинка многостебельная <i>Hieracium pluricaule</i> Schischk. & Serg.	–	3/0,1	–	–
<i>Итого видов</i>	21	17	21	14
Доля минерализованной почвы	4,3	12,3	18,3	2,9
Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	39,2	30,0	35,9	60,5
Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса	–	–	9,3	1,9

Примечание: В числителе – встречаемость, в знаменателе – проективное покрытие вида.

На местах полного сгорания органического вещества исчезают виды, размножающиеся корневищами: брусника, полынь, сон-трава, купена. Этим можно объяснить отсутствие многих лесных видов в составе живого напочвенного покрова. Наличие злаков, в первую очередь вейника наземного и луговика извилистого, – явление позитивное, поскольку они затеняют почву, предотвращая ее нагревание до критических значений, и закрепляют, существенно снижая ветровую и водную эрозию.

На всех опытных участках встречались чистые по составу парцеллы из осоки ложносытевой. В отдельных случаях эти парцеллы занимали площадь более 100 м² и были расположены преимущественно на пологих или ровных участках склонов. Осока ложносытевая образовывала плотные заросли, в определенной степени препятствуя появлению самосева древесных пород.

Коэффициент флористического разнообразия по сравниваемым объектам – от 0,52 до 0,75 (табл. 5). Больше всего общих видов зафиксировано на подножии склона и в средней части склона.

Таблица 5

Коэффициент Жаккара для исследованных гарей
The Jaccard index for the studied burnt areas

	2	3	4
1	0,75	0,63	0,63
2	–	0,61	0,52
3	–	–	0,52
4	–	–	–

Заключение

Таким образом, состав фитоценозов на горях не отличался большим разнообразием. В составе живого напочвенного покрова выделено от 15 до 18 видов. Подлесок представлен 6 видами. Зафиксирован подрост сосны обыкновенной численностью 27–62 экз./га. Коэффициент флористического разнообразия во всех случаях выше 0,5, т. е. количество общих видов на объектах исследования составляло от 52 до 75 %. Вместе с тем доля участия отдельных видов в формировании растительного покрова различна, что связано с рельефом местности. У подножия склонов видов растительности больше, их общее проективное покрытие превосходит проективное покрытие на опытных участках в верхней части склонов. На верхней части склонов преобладают ксерофиты, больше доля минерализованной поверхности, лишенная растительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баханова М.В., Кисова С.В., Коновалова Е.В., Гладинов А.Н., Содбоева С.Ч. Искусственное и естественное лесовосстановление на горях с учетом особенностей природно-климатических условий Республики Бурятия: метод. указ. Улан-Удэ: Бурят. гос. с.-х. акад. им. В.Р. Филиппова, 2022. 47 с.
Bakhanova M.V., Kisova S.V., Konovalova E.V., Gladinov A.N., Sodboeva S.Ch. *Artificial and Natural Reforestation of Burnt Areas Taking into Account the Peculiarities of Natural and Climatic Conditions of the Republic of Buryatia*: Instruction Notes. Ulan-Ude, Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, 2022. 47 p. (In Russ.).
2. Беляева Н.В., Сергеева А.С., Казу И.А. Формирование подроста хвойных пород на горях в зависимости от парцеллярной структуры фитоценоза // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2020. № 58. С. 6–11.
Beliaeva N.V., Sergeeva A.S., Kazi I.A. Formation of Undergrowth of Coniferous Species in Burning Areas Depending on the Partial Structure of Phytocenosis. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2020, no. 58, pp. 6–11. (In Russ.).
3. Бузыкин А.И. Сосновые леса восточного Прибайкалья и возобновление в них // Лесовосстановительные исследования в лесах Сибири. 1965. № 2. С. 3–15.
Buzykin A.I. Pine Forests of the Eastern Baikal Region and Their Restoration. *Lesovosstanovitel'nye issledovaniya v lesakh Sibiri*, 1965, no. 2, pp. 3–15. (In Russ.).
4. Гаврилова О.И., Колганов Е.С., Пак К.А. Оценка успешности самовозобновления сосны на горях // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 142–149.
Gavrilova O.I., Kolganov E.S., Pak K.A. Evaluation of Success of Pine Self-Renewal Forests on Burnt-out Areas. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 142–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/11>
5. Гордей Н.В., Тегленков Е.А. Исследование постпирогенных лесовозобновительных процессов в сосновых насаждениях // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесн. хоз-во. 2015. № 1(174). С. 54–57.
Gordey N.V., Teglenkov E.A. Research of Post Pyrogenic Reforestation Processes in Pine Plantations. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyajstvo = Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry*. 2015, no. 1(174), pp. 54–57. (In Russ.).
6. Грязькин А.В., Беляева Н.В., Казу И.А., Ефимов А.В., Сырников И.А. Особенности роста подроста сосны под пологом древостоев на сухих бедных почвах // Research Science (Banská Bystrica). 2019. № 8. С. 3–6.
Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Kazi I.A., Efimov A.V., Syrnikov I.A. Features of the Growth of Pine Undergrowth under the Canopy of Forest Stands on Dry Poor Soils. *Research Science (Banská Bystrica)*, 2019, no. 8, pp. 3–6. (In Russ.).

7. Ковалева Н.М., Жила С.В., Иванова Г.А. Формирование живого напочвенного покрова на начальной стадии пирогенной сукцессии в сосняках нижнего Приангарья // Хвойные бореал. зоны. 2012. Т. XXX, № 3–4. С. 265–269.

Kovaleva N.M., Zhila S.V., Ivanova G.A. Formation of Living Ground Cover at the Initial Stage of Pyrogenic Succession in Pine Forests of the Lower Angara Region. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2012, vol. XXX, no. 3–4, pp. 265–269. (In Russ.).

8. Комарова Т.А. Динамика продуктивности травянистых растений в ходе послепожарных сукцессий в лесах южного Сихотэ-Алиня // Ботан. журн. 1996. Т. 81, № 6. С. 50–62.

Komarova T.A. Dynamics of Herbaceous Plant Productivity during Post-Fire Successions in the Forests of Southern Sikhote-Alin. *Botanicheskij zhurnal*, 1996, vol. 81, no. 6, pp. 50–62. (In Russ.).

9. Патент 2084129 РФ, МКИ С 6 А 01 G 23/00. Способ учета подроста: № 94022328/13: заявл. 10.06.94: опубл. 20.07.97 / А.В. Грязькин.

Gryaz'kin A.V. *The Method of Accounting for Undergrowth*. Patent RF no. 2084129, 1997. (In Russ.).

10. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. Режим доступа: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 12.01.24).

Plantarium. Plants and Lichens of Russia and Neighbouring Countries: Open Online Galleries and Plant Identification Guide. (In Russ.).

11. Побединский А.В. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья: моногр. М.: Наука, 1965. 268 с.

Pobedinskij A.V. *Pine Forests of Central Siberia and Transbaikalia*: Monograph. Moscow, Nauka Publ., 1965. 268 p. (In Russ.).

12. Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на гарях в лесостепи Западной Сибири // Сиб. лесн. журн. 2019. № 5. С. 22–29.

Sannikova N.S., Sannikov S.N., Kochubei A.A., Petrova I.V. Natural Pine Regeneration on Burns in Forest-Steppe of Western Siberia. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2019, no. 5, pp. 22–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20190503>

13. Boxall P.C., Murray G., Unterschultz J.R., Boxall P.C. Non-Timber Forest Products from the Canadian Boreal Forest: an Exploration of Aboriginal Opportunities. *Journal of Forest Economics*, 2003, vol. 9, no. 2, pp. 75–96. <https://doi.org/10.1078/1104-6899-00027>

14. Cioacă L., Enescu C.M. Trends in the Evolution of Harvesting of Non-Wood Forest Products in Romania. *Research Journal of Agricultural Science*, 2018, vol. 50(4), pp. 82–86.

15. Enescu C.M. Which are the Most Important Non-Wood Forest Products in the Case of Ialomița County. *AgroLife Scientific Journal*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 98–103.

16. Hille M., den Ouden J. Fuel Load, Humus Consumption and Humus Moisture Dynamics in Central European Scots Pine Stands. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, vol. 14, no. 2, pp. 153–159. <https://doi.org/10.1071/WF04026>

17. McCarthy N., Bentsen N.S., Willoughby I., Balandier P. The State of Forest Vegetation Management in Europe in the 21st Century. *European Journal of Forest Research*, 2011, vol. 130, pp. 7–16. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0429-5>


18. McRae D.J., Conard S.G., Ivanova G.A., Sukhinin A.I., Baker S.P., Samsonov Y.N., Blake T.W., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Churkina T.V., Hao W.M., Koutzenogij K.P., Kovaleva N. Variability of Fire Behavior, Fire Effects, and Emissions in Scotch Pine Forests of Central Siberia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, vol. 11, pp. 45–74. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-1008-4>

19. Nygren A., Lacuna-Richman C., Keinänen K., Alsa L. Ecological, Socio-Cultural, Economic and Political Factors Influencing the Contribution of Non-Timber Forest Products to Local Livelihoods: Case Studies from Honduras and the Philippines. *Small-Scale Forest Economics, Management and Policy*, 2006, vol. 5, pp. 249–269. <https://doi.org/10.1007/s11842-006-0013-5>

20. Sukhbaatar G., Nachin B., Purevragchaа B., Ganbaatar B., Mookhor K., Tseveen B., Gradel A. Which Selective Logging Intensity is Most Suitable for the Maintenance of Soil Properties and the Promotion of Natural Regeneration in Highly Continental Scots Pine Forests?—Results 19 Years after Harvest Operations in Mongolia. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 2, art. no. 141. <https://doi.org/10.3390/f10020141>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

 ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ
ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Обзорная статья

УДК 630*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-145-163

Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки

К.П. Рукомойников[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: N-6961-2019.*

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

Т.В. Сергеева, *аспирант*; *ResearcherID: AAY-9142-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

Т.А. Гилязова, *аспирант*; *ResearcherID: AFY-3945-2022.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

Е.М. Царев, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAB-2166-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

В.П. Комисар, *канд. филол. наук, доц.*; *ResearcherID: AAK-4178-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8216-5826>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,
г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; RukomojnikovKP@volgatech.net[✉], Sergeeva2010t@mail.ru,
tat-gilyazova@yandex.ru, CarevEM@volgatech.net, KomisarVP@volgatech.net

Поступила в редакцию 10.01.24 / Одобрена после рецензирования 14.03.24 / Принята к печати 19.03.24

Аннотация. Описана история развития имитационного моделирования в сфере функционирования машин для валки леса, названы основные лидеры в разработке систем компьютерной поддержки принятия управленческих решений, перечислены преимущества и недостатки различных подходов к имитационному моделированию производственного процесса в лесу. Целью исследования стала оценка достижений в данной области и поиск путей повышения их эффективности и совершенствования. Отмечено, что имитационный подход исключает колебания результатов из-за неконтролируемых факторов, таких как воздействие оператора и погода, а редкие нециклические рабочие элементы и задержки различных видов могут быть исключены из имитационной модели. Это облегчает сравнение производительности альтернативных систем машин и технологий в идеальных условиях. Проведенный обзор позволяет заострить внимание ученых на недостаточной изученности функционирования машин на валке деревьев при несплошных рубках леса; необходимости увеличения числа анализируемых факторов, повышающих точность моделирования; максимального использования в моделях современных технологических рекомендаций по работе операторов лесных машин; важности создания математических зависимостей с учетом факторов, влияющих на эффективность труда. Сделан вывод, что существующие модели перспективны, но все еще оставляют большое поле деятельности для дальнейшей модернизации и новых исследований. Обзор наглядно демонстрирует значительное увеличение числа анализируемых показателей природно-производственного процесса при имитационном моде-

лировании по сравнению с математическим и сокращение трудовых и материальных затрат по сравнению с изучением технологических процессов в производственных условиях. Имитационное моделирование машинной валки леса позволяет учесть влияние случайных факторов внешней среды, а также факторов взаимодействия лесозаготовительной техники. Широкое внедрение подобных компьютерных систем при заготовке лесоматериалов повысит эффективность технологических карт освоения лесных участков и обоснования нормативных показателей работы машин.

Ключевые слова: компьютерная поддержка принятия управленческих решений, моделирование лесосечных работ, технологический процесс лесосечных работ, производительность, время цикла, имитационный эксперимент, валка леса

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

Для цитирования: Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Комисар В.П. Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 145–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-145-163>

Review article

Simulation Modeling of Technological Processes of Logging

Konstantin P. Rukomajnikov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

Tatiana V. Sergeeva, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAV-9142-2020](https://orcid.org/0000-0002-6367-8340), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

Tatiana A. Gilyazova, Postgraduate Student; ResearcherID: [AFY-3945-2022](https://orcid.org/0000-0001-6067-7185), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

Evgeny M. Tsarev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

Vera P. Komisar, Candidate of Philology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAK-4178-2020](https://orcid.org/0000-0001-8216-5826), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8216-5826>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; RukomajnikovKP@volgatech.net[✉], Sergeeva2010t@mail.ru, tat-gilyazova@yandex.ru, CarevEM@volgatech.net, KomisarVP@volgatech.net

Received on January 10, 2024 / Approved after reviewing on March 14, 2024 / Accepted on March 19, 2024

Abstract. The history of the development of simulation modeling in the field of operation of forest felling machines is described, the main leaders in the development of computer support systems for managerial decision-making are named, and the advantages and disadvantages of various approaches to simulation modeling of the production process in the forest are listed. The aim of the research has been to evaluate achievements in this field and find ways to increase their effectiveness and improvement. It has been noted that the simulation approach eliminates fluctuations in results due to uncontrollable factors such as operator exposure and weather conditions, and rare non-cyclical working elements and delays of various types can be excluded from the simulation model. This facilitates comparison of the performance of alternative machine systems and technologies under ideal conditions. The conducted review makes it possible to focus the attention of scientists on the lack of knowledge of the



functioning of machines for felling trees in conditions of non-continuous logging; the need to increase the number of analyzed factors that improve the accuracy of modeling; maximum use in models of modern technological recommendations for the work of forest machine operators; the importance of creating mathematical dependencies taking into account factors affecting labour efficiency. It has been concluded that the existing models are promising, but still leave a large field for further modernization and new research. The review clearly demonstrates a significant increase in the number of analyzed indicators of the natural production process in simulation modeling compared to mathematical one and a reduction in labour and material costs compared to the research of technological processes in production conditions. Simulation modeling of machine felling allows taking into account the influence of random environmental factors, as well as factors of interaction between logging equipment. The widespread introduction of such computer systems in timber harvesting will increase the efficiency of technological maps for the development of forest plots and the substantiation of standard machine performance indicators.

Keywords: computer support for managerial decision-making, logging simulation, technological technological process of logging operations, performance, cycle time, simulation experiment, felling
Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

For citation: Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Komisar V.P. Simulation Modeling of Technological Processes of Logging. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1, pp. 145–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-145-163>

В настоящее время существуют математические алгоритмы для расчета производительности машин, обоснования трудозатрат на выполнение различных технологических операций. Лесная отрасль не является исключением. Математическое моделирование [4, 5, 9, 17, 20, 29] и, в частности, имитационное моделирование [1, 12], технологических процессов широко используется на всех стадиях лесозаготовительного производства. При проектировании технологии работ в лесной отрасли нашли применение системы математического моделирования для прогноза объемов заготовленного сырья и трудозатрат на этапах технологического процесса [13, 19, 24, 63, 77], расчета топлива лесозаготовительной техники при выполнении цикла лесосечных работ и перебазировок лесосечных машин [22, 23], для решения транспортных задач при перевозке заготовленного сырья и конечной продукции [64, 82], а также решения комплексных задач управления лесохозяйственными и лесозаготовительными процессами [6–8, 28].

На лесных участках разных стран на валке деревьев широко используются разнообразные одно- и многооперационные лесосечные машины. В частности, почти 100 % лесозаготовок в Швеции и Финляндии осуществляются системами машин для сортиментной заготовки древесины с применением комплекта машин из харвестера и форвардера [62]. В этих и других странах было проведено несколько исследований, включая анализ производительности и затрат [88], оценку харвестера в цепочке поставок древесины [52, 92, 101]. В Северной Америке системы машин для сортиментной заготовки используются примерно в 20–30 % случаев [53], уступая позиции специализированным валочным машинам. Еще меньше таких систем применяется на юго-востоке

США, где зафиксировано не более 1 % случаев ее использования [68]. В России доля сортиментной заготовки леса в общем объеме рубок составляет примерно 30 %, а на Северо-Западе доходит до 90 %, что связано с близостью Финляндии и небольшими размерами лесосек.

Оценка производственной эффективности машин для заготовки леса [21, 106] является актуальной по причине различных природно-производственных условий на каждой лесосеке. Учесть влияние всех природно-производственных факторов в реальных условиях затруднительно ввиду необходимости проведения значительного числа экспериментальных исследований с целью достижения достоверных результатов.

В случае экспериментальных исследований работы машины в реальных производственных условиях при обосновании нормативов выработки лесных машин наблюдения должны осуществляться за эталонным, физически здоровым рабочим, находящимся в бодром состоянии, в отсутствии не связанных с его производственной деятельностью проблем, не осознающим того, что происходит фотохронометражная фиксация всех его действий. Создание таких условий представляется сложно контролируемым, а в случае их невыполнения достоверность опытов может быть подвергнута сомнениям. Фотохронометражные наблюдения связаны с неточностью выбора фиксажных точек наблюдателем и многими другими факторами, которые реально исключить при решении данных вопросов точными математическими методами. В связи с этим методика обоснования норм выработки, базирующаяся на проведении фотохронометражных наблюдений, является не только излишне трудоемкой, но также зачастую оказывается недостоверной.

Имитационное моделирование [10, 14, 15] основано в первую очередь на природных (количество и взаимное расположение деревьев, подлеска, подроста и т. д.) и производственных (технология работы, технические характеристики техники: скорость движения машины, угловая и линейная скорости движения манипулятора) условиях. Именно такие природно-производственные факторы, поддающиеся четкому математическому анализу, должны быть использованы при обосновании норм выработки, а не индивидуальные личностные и профессиональные качества оператора. Лишь в случае математического подхода из анализа могут быть максимально исключены задержки, вызванные работой оператора и не связанные с природно-производственными условиями лесосеки, для обоснования норм выработки в рамках эффективного машино-часа. В настоящее время, когда в распоряжении ученых есть такой инструмент анализа, как имитационное моделирование технологических процессов, упор в обосновании норм выработки следует сделать именно на него. Применение современных языков программирования позволяет оценить все необходимые траектории движения как самой машины, так и ее отдельных технологических элементов, исключая непроизводительные потери времени и неверные действия оператора машины.

В логически верно построенную имитационную модель должны быть заложены точки размещения деревьев, технические характеристики машины, технология работы и последовательность действий оператора. Этого достаточно, чтобы имитировать работу без учета задержек, связанных с эмоциональными, профессиональными, личностными и физическими качествами оператора.

В итоге создается эталонный показатель деятельности оператора, а благодаря использованию принципа проведения многократных имитационных экспериментов у исследователя появляется возможность анализа различных вариаций природных условий с заданными им основными исходными параметрами. Имитационная модель позволяет оценить диапазон варьирования искомым результатов работы, обосновать верхнюю и нижнюю границы этого доверительного интервала, соответствующие наилучшим и наихудшим из технически возможных производственных результатов выработки. Значения, попадающие в этот интервал, следует утвердить в качестве норматива для машины. Нижняя граница описанного интервала может быть принята за норматив, который достигается при непрерывной, отлаженной работе оператора при самом негативном для него сочетании исследуемых природных условий лесосеки. Это значение правильно признать за нормативный показатель деятельности оператора в рамках эффективного машино-часа в отсутствие технических неполадок используемой техники.

Основными лидерами в разработке компьютерной поддержки принятия управленческих решений в нормировании труда на лесосечных работах, в частости систем имитационного моделирования, являются:

Америка: В.Р. Hartsough [72], Y. Li [79], J. Wang et al. [75, 94, 97–99], W.D. Greene et al. [69], J.L. Garbini et al. [61], K. Stampfer et al. [90], D.M. Aedo-Ortiz et al. [44], S.U. Randhawa et al. [85], S.A. Winsauer et al. [102, 105], W.B. Stuart [91], B.B. Bare et al. [46], D.P. Bradley et al. [50], L.E. Fisher et al. [56], S.E. O’Hearn et al. [84], D.V. Goulet et al. [65, 66], D.B. Webster [100], J.R. Killham [78], L.R. Johnson et al. [74, 75], L.D. Kellogg et al. [76], J.F. McNeel et al. [81] и др.;

Финляндия: А. Asikainen [45], Т. Nurminen et al. [83] и др.;

Швеция: D. Bergström et al. [47, 48], L. Sängstuvall et al. [87], O. Lindroos [80], L. Eliasson et al. [54];

Центральная Европа (Италия, Австрия): R. Spinelli et al. [89];

Россия: А.П. Соколов и др. [30–33], Ю.Ю. Герасимов и др. [2], Д.В. Черник [41], О.Р. Чайка и др. [38–40], Ю.А. Ширнин и др. [42], С.Н. Перский [16], Ю.В. Суханов и др. [35], А.К. Редькин и др. [18], А.В. Макаренко [11] и др.

Существуют также совместные научные изыскания ученых разных стран. К примеру, исследования В. Talbot (Южная Африка) и К. Suadicani (Дания) [93] и др.

Имитационные модели предоставляют ценные гибкие инструменты для оценки возможностей лесопромышленного комплекса, например, концепций развития лесозаготовительных машин, и поэтому вызывают повышенный интерес у ученых различных стран. С использованием моделирования технологических процессов конкретное действие может быть выполнено несколько раз с разными настройками программы.

Самой ранней попыткой имитационного моделирования являлось имитирование заготовки балансов с применением детерминированного подхода, реализованное в США [73, 100]. В дальнейшем L.R. Johnson et al. [74, 75] провели более широкое моделирование технологического процесса, допускающее использование случайных факторов. Однако наряду с перспективностью предложенного направления работы, полученные результаты показали необходимость дополнительных исследований в данном направлении.

Модель симуляции складирования, измельчения, сортировки, погрузки, транспортировки и выгрузки лесоматериалов была предложена В.В. Vare et al. [46] для оценки процессов обработки порубочных остатков. Однако эта модель не позволяла охарактеризовать взаимосвязи между операциями.

Обобщение 8 имитационных моделей, доступных до 1980 г., с сопоставлением их свойств было выполнено D.V. Goulet et al. [65, 66].

W.B. Stuart [91] разработал систему моделирования функционирования лесосечных машин, которая определяла доступную для движения манипулятора часть пасаки и имитировала спиливание ближайшего к ней дерева с дальнейшим переходом к следующему ближайшему дереву.

Были предложены имитационная модель проверки работоспособности валочно-пакетирующей машины с резиновыми шинами [104] и грейферного трелевочного трактора и рубительной машины для измельчения деревьев [103]. Модели реализованы на языке Fortran и представляли собой дискретные программы имитирования событий для оценки производительности как отдельных, так и взаимодействующих между собой машин.

J.L. Garbini et al. [61] осуществили сочетание методов численного моделирования на языке Fortran с графической анимацией. Численное моделирование использовалось для расчета расположения деревьев и заготовленной древесины, а графическая анимация давала возможность быстрого поиска ошибок, вызванных числовым моделированием. Входными данными являлись характеристики сырья и готовой продукции, а также параметры самой машины.

J.L. Fridley et al. [57–60] с использованием моделирования и графической анимации объектов технологического процесса исследовали работу валочно-пакетирующей машины при рубках прореживания с целью анализа воздействия различных конструктивных параметров машины на ее эффективность.

При моделировании валочно-пакетирующей машины W.D. Greene et al. [67, 69, 70] изучили влияние насаждений и эксплуатационных факторов на ее производительность. Был сделан вывод, что средний диаметр деревьев и их количество являются наиболее важными из факторов, а ширина пасаки и среднее расстояние между деревьями играют меньшую роль. В процессе интерактивного моделирования ученые обнаружили, что влияние человеческого фактора на работу машины минимально [71].

Анализ значимости изменения физических параметров валочно-пакетирующей машины был осуществлен на базе 3-мерной цветной интерактивной компьютерной графической симуляции в режиме реального времени, разработанной W.A. Block et al. [49]. Программное обеспечение позволяло пользователю оценивать производительность при изменении физических параметров техники.

J. Wang et al. [98] предложили интерактивную систему моделирования древостоев и анализа производительности лесосечных машин. Моделирование выполнялось путем перемещения изображений машин на картах древостоев на экране компьютера. Оценены потенциальные взаимодействия типа древостоя, метода сбора урожая и оборудования. Исследованы 3 метода валки (бензопила, валочно-пакетирующая машина и харвестер) и 2 способа трелевки (грейферный трелевочный трактор и форвардер) как для разновозрастного древостоя, так и для одновозрастного. Метод полезен при сравнении альтер-

нативных систем в различных ситуациях сбора заготовленной древесины. Для повышения эффективности разработана событийно-ориентированная имитационная модель [95, 96].

Анализ существующих исследований показывает, что наибольшую сложность при моделировании вызывают перемещения валочной машины, выполняющей выборочные рубки. Техника, задействованная на валке, должна осуществлять движения с избеганием повреждений оставляемых на дорашивание деревьев, эффективно перемещаясь между спиливаемыми деревьями. Многие имитационные модели либо не учитывают движения лесосечных машин в этих условиях, либо делают это неадекватно. Предложен вариант оценки повреждения деревьев в ходе лесосечных работ с использованием интерактивной программы компьютерной симуляции. Она могла имитировать эффективность лесосечных работ в различных лесохозяйственных условиях [51]. При эмпирическом сравнении компьютерной модели и реальных производственных объектов модель с оценкой ущерба оставляемым на дорашивание деревьям хорошо себя зарекомендовала, но ее развитие с применением данных других лесосечных машин и древостоев может значительно повысить эффективность моделирования.

Современная среда и методы компьютерного моделирования XXI в. значительно улучшили и расширили подходы к имитированию лесосечных работ, использовавшиеся ранее. В частности, Y. Li [79] была разработана система моделирования путем оценки производительности, затрат и интенсивности движения при различных конфигурациях лесосек и способах рубок. Рассмотрены 5 способов рубок, реализуемых в Северной Америке. Автор предусмотрел отдельный блок программы для генерации древостоя, который может быть отображен как в 2-мерном, так и в 3-мерном пространстве моделирования. Результаты показали, что на производительность и стоимость работ в первую очередь влияли размер удаляемых деревьев, интенсивность вырубki, расстояние между срубленными деревьями и технические характеристики машин. Сплошные рубки всегда давали наибольшую производительность, а выборочные были наименее производительны.

Данная модель отличается детальностью анализа препятствий на пути манипулятора к захватываемому дереву, при этом она дает возможность наблюдения как за харвестером, так и за валочно-пакетирующей машиной, перемещающимися по пасекам. Однако в случае использования харвестера предусмотрено, что он движется по волоку, все деревья на котором удалены до начала движения машины в ходе предыдущих этапов рубки, что не всегда соответствует варианту ведения работ на обширных лесных территориях РФ, не тронутых рубками. Кроме того, в модели не учтены рекомендации по последовательности освоения рабочих зон вблизи харвестера, отсутствует анализ траектории движения манипулятора при перемещении поваленных деревьев в зону их обработки с минимизацией повреждений оставляемых на дорашивание деревьев, не приняты во внимание рекомендации по зонам укладки сортиментов вблизи харвестера. Также не учтен крупный подлесок, создающий значительные препятствия на пути движения манипулятора в лиственных и смешанных древостоях.

Имитационный подход исключает колебания результатов из-за неконтролируемых факторов, таких как воздействие оператора [80] и погодных условий.

Редкие нециклические рабочие элементы [55], а также задержки различных видов [89] могут быть исключены из имитационной модели. Это облегчает сравнение производительности альтернативных систем в идеальных условиях.

Значительный интерес представляет исследование L. Sängstuvall et al. [87], в котором представлена первая имитационная модель выборочной обработки нескольких деревьев за цикл движения манипулятора. Особое внимание уделено сохранности оставляемых деревьев в процессе наведения манипулятора на удаляемые деревья. Оценена продуктивность инновационных систем при рубках ухода молодняка с широкими диапазонами среднего диаметра (1,5–15,6 см), деревьев на площади (1000–19 100 дер./га) и средней высоты (2,3–14,6 м). Для анализа использованы 56 типовых насаждений, характерных для большей части территории Швеции и не подвергавшихся 1-му прореживанию. Базовые уровни интенсивности рубки были установлены в 30, 40 и 50 % от общей площади древостоя с доведением числа деревьев до 1000–4000 дер./га. Компьютерное программирование и моделирование выполнены с использованием программного обеспечения MatLab. Несмотря на то, что результаты моделирования предусматривали участки без предварительного прореживания и прокладку волока в ходе основной рубки за счет движения харвестера, они соответствуют лишь работе в молодняках с большим количеством тонкомерных деревьев, требования к сохранности которых в процессе рубки гораздо ниже, чем при рубках прореживания, проходных и выборочных рубках в спелых древостоях, а следовательно, предполагают дополнительные исследования для случая более возрастных древостоев. Проведен анализ геометрического метода выбора деревьев в рубку, подходящего только для молодых насаждений.

Среди современных российских исследований в области имитационного моделирования технологического процесса на лесосеках особого внимания заслуживают разработки Петрозаводского государственного университета на языке C++. Ю.В. Сухановым и др. [34–36], А.П. Соколовым [30, 31] выполнена симуляция действий специализированных лесосечных машин, которая наряду с анализом производительности позволяет эффективно учитывать повреждения наносимые оставляемым на доращивание деревьям при наведении манипулятора, валке дерева, его подтаскивании и обработке, при перемещении харвестера по технологическому коридору в условиях сложного рельефа. Программа эффективно оценивает доступность деревьев и рассчитывает время наведения манипулятора на выбранное дерево. При этом математические зависимости, отслеживающие время движения манипулятора к дереву, предусматривают синхронизацию операций поворота манипулятора и его прямолинейного перемещения к дереву. Однако уделено недостаточное внимание тому, что синхронизация операций более характерна для сплошных рубок и не всегда достижима при выборочных, при которых возможность движения манипулятора по кратчайшей траектории ограничена и предполагается его последовательное перемещение в обход препятствий с разделением угловых и прямолинейных движений на несколько этапов. Не учтено разделение обрабатываемой с одной рабочей позиции площадки на зоны, а следовательно, программа не может анализировать варианты технологической очередности валки деревьев с одной рабочей позиции.

Вариант имитационной модели, позволяющей учесть препятствия для движения манипулятора лесного харвестера в виде оставляемых на доращивание деревьев нецелевого компонента рубки и крупного подлеска, предложен сотрудниками Поволжского государственного технологического университета [25–27, 86]. В отличие от ранее созданных систем моделирования процессов освоения лесных участков, использующих метод дискретно-событийного имитационного моделирования, основным методом для реализации проекта был выбран метод агентного имитационного моделирования процессов, анализирующий действия децентрализованных динамически взаимодействующих агентов и симулирующий производственные процессы, переходя от показателей микроуровня к показателям макроуровня. Система представляется в виде агентов: заявок, ресурсов и обслуживаемых систем. Каждый агент может иметь свою программную реализацию, что дает возможность последующего внедрения в модель дополнительных агентов моделирования без нарушения целостности работы всей системы.

В своих исследованиях В.В. Журавлев и др. [3], Чайка и др. [39] продемонстрировали возможности имитационного моделирования на примере харвестера в искусственных насаждениях и показали, что отдельные деревья, отобранные в рубку, могут быть доступны с 2 и более рабочих позиций харвестера, в т. ч. с соседних пасек. Ограничением модели является возможность ее использования лишь при искусственных посадках лесных насаждений рядами, что не позволяет повсеместно применять ее на практике.

Ю.Ю. Герасимов и др. [2], С.Н. Перский [16] провели проверку эффективности функционирования систем лесосечных машин на основе имитационного моделирования и ГИС-технологий. При этом учитывались как природно-производственные условия, так и параметры лесосечных машин со свойственными для них показателями надежности. Созданная модель показала свою работоспособность, но ее использование ограничено условиями сплошных рубок.

По мнению С.Б. Якимовича и др. [43], М.А. Тетериной [37], А.К. Редькина и др. [18], наиболее значимыми характеристиками симуляции лесосечных процессов являются согласованность работы лесосечных машин, степень их загрузки и продолжительность простоев, изменение допустимых нагрузочных и скоростных параметров в зависимости от режима работы машин и лесорастительных условий.

Заключение

Проведенный обзор позволяет заострить внимание ученых на недостаточной изученности работы машин, задействованных на валке деревьев в условиях несплошных рубок леса: большинство из предыдущих научных работ относятся либо к конкретным регионам, либо к определенным условиям древостоя, что обуславливает неполноту информации о производственном процессе и стоимости систем сортиментной заготовки для лесов РФ. Не все полученные в ходе ранее проведенных имитационных исследований результаты представлены их разработчиками в виде математических зависимостей с возможностью пересчета для других производственных условий без использования специализированных программных средств. Обоснованные же на данный момент математические зависимости нацелены лишь на поиск путей повышения про-

изводительности лесосечных машин для валки леса и не позволяют детально анализировать трудоемкость отдельных элементов технологического цикла работы, зависящих от природно-производственных условий лесосек. Многие рассмотренные научные труды основаны на данных, которые отличаются от встречающихся сегодня в РФ, зарубежные исследования зачастую выполнены лишь с учетом движения машины по волокам, оставшимся от предыдущих этапов рубки и не предусматривают самостоятельную расчистку волока, что не всегда характерно для обширных территорий лесов РФ. Выполненные исследования имеют ограничения по анализируемым в них факторным признакам и не принимают во внимание влияние препятствий в виде крупного подлеска на территории смешанных и лиственных лесов РФ, воздействующего на эффективность работы лесосечных машин при валке деревьев. В ходе анализа существующих систем имитационного моделирования лесосечных работ выявлено, что в них недостаточно учтены современные технологические рекомендации ведения работ, характеризующие последовательность действий оператора при освоении рабочей зоны вблизи машины. При моделировании целесообразно повышение уровня оценки действий операторов многофункциональных лесных машины, сокращающих повреждения древостоя в процессе перемещения поваленных деревьев в зону дальнейшей обработки.

Исследователи продемонстрировали полезность интерактивного компьютерного моделирования лесных машин, задействованных на валке деревьев. Однако существующие разработки оставляют большое поле деятельности для их модернизации и новых исследований. Это позволит увеличить число анализируемых показателей природно-производственного процесса по сравнению с математическим моделированием и минимизировать трудовые и материальные ресурсы по сравнению с производственными исследованиями в данной области.

Разработка систем компьютерного моделирования функционирования лесных машин является направлением, дающим возможность учесть влияние случайных факторов внешней среды, а также факторов взаимодействия техники в процессе лесозаготовительного производства. Широкое внедрение подобных компьютерных систем при заготовке древесины на лесосеках позволит повысить эффективность технологических карт освоения лесных участков и обоснования нормативных показателей работы машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Герасимов Ю.Ю., Давыдков Г.А., Кильпелайнен С.А., Соколов А.П., Сяунев В.С. Перспективы применения новых информационных технологий в лесном комплексе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 5. С. 122–129.

Gerasimov Yu.Yu., Davydkov G.A., Kilpelainen S.A., Sokolov A.P., Syunyov V.S. Prospects of Applying New Information Technologies in Forest Complex. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 5, pp. 122–129. (In Russ.).

2. Герасимов Ю.Ю., Перский С.Н. Имитационная модель сплошных рубок на основе ГИС-технологий // Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вологда: ВоГТУ, 2004. С. 286–289.

Gerasimov Yu.Yu., Perskij S.N. Simulation Model of Continuous Logging Based on GIS Technologies. *Modeling, Optimization and Intensification of Production Processes and Systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Vologda, Vologda State University, 2004, pp. 286–289. (In Russ.).

3. Журавлев В.В., Чайка О.Р. Методика оценки доступности деревьев для захвата при моделировании работы харвестера на рубках ухода в искусственных насаждениях // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 21–25.

Zhuravlev V.V., Chaika O.R. Methodology for Assessing the Availability of Trees for Capture when Modeling the Operation of a Harvester during Thinning in Artificial Plantations. *Modern Resource-Saving Technologies and Technical Means of the Forestry Complex: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry named after. G.F. Morozov, 2021, pp. 21–25. (In Russ.).

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. (In Russ.).

5. Заикин А.Н. Математическое моделирование режимов работы лесосечных машин и анализ изменения объемов оперативных запасов // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 1. С. 69–75.

Zaikin A.N. Designing of Operation Modes of Logging Machines. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 69–75. (In Russ.).

6. 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*, 2010, no. 2, pp. 72–77. (In Russ.).

7. Заикин А.Н., Сиваков В.В., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С., Зеликова Н.В. Программное обеспечение для управления лесохозяйственным и лесозаготовительным процессами: оценка применимости // Лесотехн. журн. 2022. Т. 12, № 1(45). С. 96–109.

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S., Zelikova N.V. Software for the Management of Forestry and Logging Processes: Assessment of Applicability. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2022, vol. 12, no. 1(45), pp. 96–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/8>

8. Заикин А.Н., Сиваков В.В., Никитин В.В., Брионес А.А. Программное обеспечение в лесном хозяйстве и при лесозаготовках // Лесн. вестн. 2023. Т. 27, № 4. С. 172–184.

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Nikitin V.V., Briones A.A. Software in Forestry and Logging. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 172–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-4-172-184>

9. Иванников В.А. Совершенствование системы формирования грузопотоков лесоматериалов на смежных видах транспорта: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2019. 331 с.

Ivannikov V.A. *Improving the System of Formation of Timber Freight Flows on Related Types of Transport*: Doc. Tech. Sci. Diss. Voronezh, 2019. 331 p. (In Russ.).

10. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование // Классика CS. 3-е изд. СПб: Питер; Киев: Издат. группа BHV, 2004. 847 с.

Law A.M., Kelton W.D. *Simulation Modeling and Analysis. Classics of CS*. 3rd ed. St. Petersburg, Piter, Kiev, BHV Publ. Group, 2004. 847 p. (In Russ.).

11. Макаренко А.В. Имитационное моделирование работы лесозаготовительной машины с помощью сетей Петри // Науч. тр. МГУЛ, «Технология и оборудование лесопромышленного производства». 2011. Вып. 356. С. 44–49.

Makarenko A.V. Simulation of a Logging Machine Using Petri Nets. *Scientific Works of Moscow State Forest University*, “Technology and Equipment for Forest Industry Production”, 2011, iss. 356, pp. 44–49. (In Russ.).

12. Мохирев А.П. Обоснование доступности древесных ресурсов путем моделирования структуры лесотранспортных потоков (на примере Красноярского края РФ): дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2021. 402 с.

Mokhirev A.P. *Substantiation of the Availability of Wood Resources by Modeling the Structure of Forest Transport Flows (Using the Example of the Krasnoyarsk Territory of the Russian Federation)*: Doc. Tech. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2021. 402 p. (In Russ.).

13. Мохирев А.П., Рукомойников К.П. Моделирование структуры лесотранспортных потоков. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-тет, 2022. 396 с.

Mokhirev A.P., Rukomojnikov K.P. Modeling the Structure of Timber Transport Flows. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2022. 396 p. (In Russ.).

14. Официальный сайт компании The AnyLogic Company производителя инструментов и бизнес-приложений имитационного моделирования. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 03.12.23).

The Official Website of The AnyLogic Company, a Manufacturer of Simulation Tools and Business Applications. (In Russ.).

15. Официальный сайт Национального общества имитационного моделирования. Режим доступа: <http://simulation.su/ru.html> (дата обращения: 04.12.23).

The Official Website of the National Simulation Society. (In Russ.).

16. Перский С.Н. Блок-схема имитационной модели «Сплошные рубки» // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам 5-й междунар. науч.-техн. конф. Брянск: БГИТА, 2004. Вып. 8. С. 196–197.

Perskiy S.N. Block Diagram of the Simulation Model “Clear Felling”. *Aktual'nye problem lesnogo kompleksa*: Collection of Scientific Papers on the Results of the 5th International Scientific and Technical Conference. Bryansk, Bryansk State Technological University of Engineering, 2004, iss. 8, pp. 196–197. (In Russ.).

17. Пильник Ю.Н. Методы и алгоритмы синтеза организационных структур формирования сетевых грузопотоков лесоматериалов многоуровневых транспортно-технологических систем: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2019. 340 с.

Pil'nik Yu.N. *Methods and Algorithms for Synthesizing Organizational Structures for Forming Network Freight Flows of Timber of Multi-Level Transport and Technological Systems*: Doc. Tech. Sci. Diss. Voronezh, 2019. 340 p. (In Russ.).

18. Редькин А.К., Макаренко А.В. Особенности отсчета модельного времени при имитационном моделировании работы лесозаготовительных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 3. С. 53–57.

Redkin A.K., Makarenko A.V. Countdown the Time for Simulation of Work Forest Machines. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 3, pp. 53–57. (In Russ.).

19. Рукомойников К.П. Имитационное моделирование взаимосогласованной работы комплектов адаптивно-модульных лесных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 154–158.

Rukomojnikov K.P. Imitating Modeling of Work of Complete Sets of Adaptive-Modular Wood Machines. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2013, no. 3, pp. 154–158. (In Russ.).

20. Рукомойников К.П. Выбор рациональной технологии и обоснование параметров поквартального освоения лесных участков. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-тет, 2016. 296 с.

Rukomojnikov K.P. Selection of Rational Technology and Justification of Parameters for Quarterly Development of Forest Areas. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2016. 296 p. (In Russ.).

21. Рукемойников К.П., Ведерников С.В. Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127.

Rukomoynikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimiting Knife. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 1, pp. 120–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.120>

22. Рукемойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 117–127.

Rukomojnikov K.P., Kuptsova V.O. Substantiation of Fuel Consumption Rates of a Harvester. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 3, pp. 117–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-117-127>

23. Рукемойников К.П., Купцова В.О., Сергеева Т.В. Математическая модель расхода топлива форвардера «Амкодор-2682» при выполнении лесохозяйственных работ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 148–158.

Rukomojnikov K.P., Kuptsova V.O., Sergeeva T.V. A Mathematical Model of Fuel Consumption for the Forwarder Amkodor-2682 when Performing Forestry Operations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 6, pp. 148–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-148-158>

24. Рукемойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107.

Rukomojnikov K.P., Mokhiev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 4, pp. 94–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.94>

25. Рукемойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Волдаев М.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжечных машин // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2(54). С. 108–113.

Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Voldaev M.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. Computer Simulation of the Development of Logging Sites Using a Felling-Delimiting Bucker. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2(54), pp. 108–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-2-108-113>

26. Рукемойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесн. вестн. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 3. С. 69–80.

Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. Modeling Operation of Forest Harvester in Anylogic Simulation System. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 69–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-3-69-80>

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614531 РФ. Программа моделирования работы харвестера: № 2022613687; заявл. 16.03.2022; опублик. 23.03.2022 / К.П. Рукемойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, В.П. Комиссар; заявитель – Поволж. гос. технол. ун-тет.

Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Kommissar V.P. *Harvester Operation Simulation Program*. Certificate of State Registration of a Computer Program no. 2022614531 RF. (In Russ.).

28. Сиваков В.В., Заикин А.Н., Новикова Т.П., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» // Лесотехн. журн. 2023. Т. 13, № 3(51). С. 200–218.

Sivakov V.V., Zaikin A.N., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. Digitalization of the Workflow Management System of Logging Machines: Efficiency Assessment Using the Example of “Ponsse”, “Komatsu”, and “John Deere”. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2023, vol. 13, no. 3(51), pp. 200–218. (In Russ.).

29. Соколов А.П. Комплексное освоение лесосырьевых баз: обоснование технологий и параметров процессов на основе логистического подхода: дис. ... д-ра техн. наук. Петрозаводск, 2015. 329 с.

Sokolov A.P. *Integrated Development of Forest Raw Material Bases: Substantiation of Technologies and Process Parameters Based on a Logistic Approach*: Doc. Tech. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2015. 329 p. (In Russ.).

30. Соколов А.П. Поддержка выбора технологической схемы разработки лесосеки с помощью имитационной модели // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. ст. Красноярск, 2020. С. 193–197.

Sokolov A.P. A Decision Support Method for Wood Harvesting Technological Scheme Choice. *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny*: Collection of Articles. Krasnoyarsk, 2020, pp. 193–197. (In Russ.).

31. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // Лесотехн. журн. 2017. № 3. С. 307–314.

Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation of the Production Process of Timber Harvesting with the Help of Petri Nets. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 307–314. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712

32. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование процесса лесозаготовок в условиях ветровальной лесосеки // Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2018. Вып. 5. С. 74–77.

Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation Modeling of the Logging Process in Windfall Logging Conditions. *Voprosy sovremennykh tekhnicheskikh nauk*: Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference. Yekaterinburg, 2018, iss. 5, pp. 74–77. (In Russ.).

33. Соколов А.П., Осипов Е.В. Обоснование технологии заготовки древесины с помощью имитационного моделирования на сетях Петри // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1. С. 111–119.

Sokolov A.P., Osipov E.V. Substantiation of the Technology of Wood Harvesting with the Help of Imitation Modeling on Petri Net. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 111–119. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095

34. Суханов Ю.В. Система моделирования лесозаготовок с учетом потребностей биоэнергетики // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 1(93). С. 152–157.

Suhanov Y.V. Computer Simulation of Wood Harvesting with Consideration of Bioenergy. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 1(93), pp. 152–157. (In Russ.).

35. Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Уч. зап. Петрозаводск. гос. ун-та. 2012. № 8-2(129). С. 49–51.

Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syuney V.S. Simulation modeling of Harvester Operation: Algorithms and Implementation. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo*

gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Petrozavodsk State University, 2012, no. 8-2(129), pp. 49–51. (In Russ.).

36. Суханов Ю.В., Соколов А.П., Герасимов Ю.Ю. Оценка экономической эффективности систем машин для производства топливной щепы в Республике Карелия // *Resources and Technology*. 2013. Т.10, № 1. С. 1–23.

Sukhanov Yu.V., Sokolov A.P., Gerasimov Yu.Yu. Efficiency of Forest Chip Supply Systems in Karelia. *Resources and Technology*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 1–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2013.1941>

37. Тетерина М.А. Обоснование параметров обрабатывающе-транспортной системы «харвестер-форвардер» (на примере предприятий Пермского края): дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 197 с.

Teterina M.A. Justification of the Parameters of the Processing and Transport System “Harvester-Forwarder” (Using the Example of Enterprises in the Perm Territory): Doc. Tech. Sci. Diss. Moscow, 2009. 197 p. (In Russ.).

38. Чайка О.Р., Журавлев В.В. Обоснование параметров технологического оборудования харвестеров для несплошных рубок леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 2. С. 39–40.

Chayka O.R., Zhuravlev V.V. Justification of Parameters of Harvesters’ Technological Equipment for Non-Final Loggings. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair. Reconditioning. Modernization, 2021, no. 2, pp. 39–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2021-0-2-39-40>

39. Чайка О.Р., Мухеев К.П. Алгоритм моделирования захвата и срезания деревьев харвестером на несплошных рубках леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 12. С. 30–33.

Chayka O.R., Mikheyev K.P. Simulation Algorithm for Gripping and Cutting of Trees by Harvester in Case of Incompleted Forest Felling. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Reconditioning. Modernization, 2019, no. 12, pp. 30–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-12-30-33>

40. Чайка О.Р., Фокин Н.С. Алгоритм моделирования параметров лесных насаждений // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 12. С. 41–43.

Chayka O.R., Fokin N.S. Simulation Algorithm of Parameters of Forest Plantations. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Reconditioning. Modernization, 2018, no. 12, pp. 41–43. (In Russ.).

41. Черник Д.В., Казанцев Р.В. Имитационное физическое моделирование универсальной лесозаготовительной машины // Хвойные бореал. зоны. 2020. Т. 38, № 3-4. С. 183–188.

Chernik D.V., Kazantsev R.V. Imitational Physical Modeling of a Universal Forestry Machine. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2020, vol. 38, no. 3-4, pp. 183–188. (In Russ.).

42. Ширнин Ю.А., Онучин Е.М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 66–72.

Shirnin Yu.A., Onuchin E.M. Simulation Modeling of the Movement of a Multi-Functional Forest Machine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 4, pp. 66–72. (In Russ.).

43. Якимович С.Б., Тетерина М.А. Моделирование стохастических обрабатывающе-транспортных систем с перемещаемыми запасами // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2007. № 6. С. 71–76.

Yakimovich S.B., Teterina M.A. Modeling of Stochastic Processing and Transport Systems with Moving Stocks. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2007, no. 6, pp. 71–76. (In Russ.).

44. Aedo-Ortiz D.M., Olsen E.D., Kellogg L.D. Simulating a Harvester-Forwarder Softwood Thinning: A Software Evaluation. *Forest Products Journal*, 1997, vol. 47, iss. 5, pp. 36–41.
45. Asikainen A. Simulation of Stump Crushing and Truck Transport of Chips. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 3, pp. 245–250. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.488656>
46. Bare B.B., Jayne B.A., Anholt B.F. *A Simulation-Based Approach for Evaluating Logging Residue Handling Systems*: General Technical Report PNW-45. Oregon, Portland, US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1976. 30 p.
47. Bergström D., Bergsten U., Nordfjell T., Lundmark T. Simulation of Geometric Thinning Systems and Their Time Requirements for Young Forests. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41, no. 1, art. no. 311. <https://doi.org/10.14214/sf.311>
48. Bergström D. *Techniques and Systems for Boom-Corridor Thinning in Young Dense Forests*: Doctoral Thesis. Umeå, Swedish University of Agricultural Sciences, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2009. 87 p.
49. Block W.A., Fridley J.L. Simulation of Forest Harvesting Using Computer Animation. *Transactions of the ASAE*, 1990, vol. 33, no. 3, pp. 967–974. <https://doi.org/10.13031/2013.31425>
50. Bradley D.P., Biltonen R.E., Winsaure S.A. A Computer Simulation of Full-Tree Field Chipping and Trucking. *Research Paper NC-129*. Minnesota, St. Paul, US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1976. 14 p.
51. Bragg W.C., Ostrofsky W.D., Hoffman B.F., Jr. Residual Tree Damage Estimates from Partial Cutting Simulation. *Forest Products Journal*, 1994, vol. 44, iss. 7/8, pp. 19–22.
52. Chiorescu S., Grönlund A. Assessing the Role of the Harvester within the Forestry-Wood Chain. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, iss. 2, pp. 77–84.
53. Conradie I.P., Greene W.D., Murphy G.E. Value Recovery with Harvesters in Southeastern USA Pine Stands. *2nd Forest Engineering Conference*, 2003, pp. 55–63.
54. Eliasson L., Lageson H. Simulation Study of a Single-Grip Harvester in Thinning from Below and Thinning from Above. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 6, pp. 589–595. <https://doi.org/10.1080/02827589908540824>
55. Eliasson L. Simulation of Thinning with a Single-Grip Harvester. *Forest Science*, 1999, vol. 45, iss. 1, pp. 26–34. <https://doi.org/10.1093/forestscience/45.1.26>
56. Fisher E.L., Gochenour D.L., Jr. Improved Timber Harvesting through Better Planning. A GASP IV Simulation Analysis. *Transactions of the ASAE*, 1980, vol. 23, no. 3, pp. 553–557. <https://doi.org/10.13031/2013.34622>
57. Fridley J.L., Garbini J.L., Jorgensen J.E. Interactive Simulation of Forest Thinning System Concepts. *ASAE Paper no. 82-1603*. Michigan, St. Joseph, 1982. 16 p.
58. Fridley J.L., Garbini J.L., Jorgensen J.E., Peters P.A. An Interactive Simulation for Studying the Design of Feller-Bunchers for Forest Thinning. *Transactions of the ASAE*, 1985, vol. 28, no. 3, pp. 680–686. <https://doi.org/10.13031/2013.32319>
59. Fridley J.L., Jorgensen J.E., Garbini J.L. A Rational Approach to Feller-Buncher Design for Steep Slope Thinning. *Forest Products Journal*, 1988, vol. 38, iss. 6, pp. 31–37.
60. Fridley J.L., Jorgensen J.E. Geometric Modeling to Predict Thinning System Performance. *Transactions of the ASAE*, 1983, vol. 26, no. 4, pp. 976–982. <https://doi.org/10.13031/2013.34059>
61. Garbini J.L., Lembersky M.R., Chi U.H., Hehnen M.T. Merchandiser Design Using Simulation with Graphical Animation. *Forest Products Journal*, 1984, vol. 34, no. 4, pp. 61–68.
62. Gellerstedt S., Dahlin B. Cut-to-Length: The Next Decade. *International Journal of Forest Engineering*, 1999, vol. 10, iss. 2, pp. 17–24.

63. Gerasimov Y., Sokolov A., Fjeld D. Improving Cut-to-Length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, iss. 1, pp. 89–105.
64. Gerasimov Y., Sokolov A., Karjalainen T. GIS-Based Decision-Support Program for Planning and Analyzing Short-Wood Transport in Russia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 163–175.
65. Goulet D.V., Iff R.H., Sirois D.L. Tree-to-Mill Forest Harvesting Simulation Models: Where are We? *Forest Products Journal*, 1979, vol. 29, no. 10, pp. 50–55.
66. Goulet D.V., Iff R.H., Sirois D.L. Five Forest Harvesting Simulation Models. Part II: Paths, Pitfalls, and Other Considerations. *Forest Products Journal*, 1980, vol. 30, no. 8, pp. 18–22.
67. Greene W.D., Fridley J.L., Lanford B.L. Operator Variability in Interactive Simulations of Feller-Bunchers. *Transactions of the ASAE*, 1987, vol. 30, no. 4, pp. 918–922. <https://doi.org/10.13031/2013.30499>
68. Greene W.D., Jackson B.D., Culpepper J.D. Georgia's Logging Businesses, 1987 to 1997. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, iss. 1, pp. 25–28.
69. Greene W.D., Lanford B.L. Geometric Simulation of Feller-Bunchers in Southern Pine Plantation Thinning. *ASAE Paper no. 84-1612*. Michigan, St. Joseph, 1984. 17 p.
70. Greene W.D., Lanford B.L. *An Interactive Simulation Program to Model Feller-Bunchers*. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn, 1986, Bulletin no. 576.
71. Greene W.D., Lanford B.L., Mykytka E.F. Stand and Operating Effects on Feller-Buncher Productivity in Second Thinnings of Southern Pine. *Forest Products Journal*, 1987, vol. 37, iss. 3, pp. 27–34.
72. Hartsough B.R., Zhang X., Fight R.D. Harvesting Cost Model for Small Trees in Natural Stands in the Interior Northwest. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, iss. 4, pp. 54–60.
73. Hool J.N., Bussel W.H., Leppert A.M., Harmon G.R. Pulpwood Production System Analysis – a Simulation Approach. *Journal of Forestry*, 1972, vol. 70, iss. 4, pp. 214–215.
74. Johnson L.R., Biller C.J. Wood-Chipping and a Balanced Logging System: Simulation Can Check the Combinations. *Transactions of the ASAE*, vol. 17, no. 4, pp. 651–655.
75. Johnson L.R., Gochenour D.L., Jr., Biller C.J. Simulation Analysis of Timber-Harvesting Systems. *23rd Annual Conference and Convention*. California, Anaheim, American Institute of Industrial Engineers, 1972, pp. 353–362.
76. Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning Productivity and Cost for a Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, iss. 2, pp. 43–54. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>
77. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical Model of Interaction between Forest Machine Mover and Consolidating Soil. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1177, art. no. 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012030>
78. Killham J.R. *The Development of a Forest Harvesting Simulation Model*: M.S. Thesis. Alabama, Auburn, Auburn University, 1975. 354 p.
79. Li Y. Modeling Operational Forestry Problems in Central Appalachian Hardwood Forests. *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*, 2005, art. no. 4166. <https://doi.org/10.33915/etd.4166>
80. Lindroos O. The Effects of Increased Mechanization on Time Consumption in Small-Scale Firewood Processing. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, no. 5, art. no. 227. <https://doi.org/10.14214/sf.227>
81. McNeel J.F., Rutherford D. Modelling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 6, iss. 1, pp. 7–14. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702661>

82. Mokhiev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the Optimal Route of Wood Transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, art. no. 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012053>
83. Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-Length Harvesting System. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 2, art. no. 346. <https://doi.org/10.14214/sf.346>
84. O'Hearn S.E., Stuart W.B., Walbridge T.A. Using Computer Simulation for Comparing Performance Criteria between Harvesting Systems. *American Society of Agricultural Engineers Paper*, 1976, no. 76, art. no. 1567.
85. Randhawa S.U., Scott T.M. Model Generation for Simulation Analysis: an Application to Timber Harvesting. *Computers and Industrial Engineering*, 1996, vol. 30, iss. 1, pp. 51–60. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(95\)00030-5](https://doi.org/10.1016/0360-8352(95)00030-5)
86. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Komisar V.P. Computer Modeling to Support Management and Organizational Decisions in the Use of a Forest Harvester. *Proceedings of SPIE*, 2022, vol. 12251, Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD2021). 122510 p. <https://doi.org/10.1117/12.2631137>
87. Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of Harvester Productivity in Selective and Boom-Corridor Thinning of Young Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 1, pp. 56–73. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>
88. Spinelli R., Owende P., Ward S.M. Productivity and Cost of CTL Harvesting of *Eucalyptus globulus* Stands Using Excavator-Based Harvesters. *Forest Products Journal*, 2002, vol. 52, iss. 1, pp. 67–77.
89. Spinelli R., Visser R. Analyzing and Estimating Delays in Harvester Operations. *International Journal of Forest Engineering*, 2008, vol. 19, iss. 1, pp. 36–41. <https://doi.org/10.1080/14942119.2008.10702558>
90. Stampfer K., Henoeh J. Process Simulation to Evaluate Steep Terrain Harvesting Systems. *Landwards, The Institution of Agriculture Engineers*, 1999, vol. 54, no. 3, pp. 1–11.
91. Stuart W.B. Harvesting Analysis Technique: a Computer Simulation System for Timber Harvesting. *Forest Products Journal*, 1981, vol. 31, iss. 11, pp. 45–53.
92. Talbot B., Nordfjell T., Suadicani K. Assessing the Utility of Two Integrated Harvester-Forwarder Machine Concepts Through Stand-Level Simulation. *International Journal of Forest Engineering*, 2003, vol. 14, iss. 2, pp. 31–43. <https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702476>
93. Talbot B., Suadicani K. Analysis of Two Simulated In-Field Chipping and Extraction Systems in Spruce Thinnings. *Biosystems Engineering*, 2005, vol. 91, iss. 3, pp. 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.014>
94. Wang J., Greene W.D. An Interactive Simulation System for Modeling Stands, Harvests, and Machines. *International Journal of Forest Engineering*, 1999, vol. 10, iss. 1, pp. 81–99.
95. Wang J., Greene W.D., Stokes B. Stand, Harvest, and Equipment Interactions in Simulated Harvesting Prescriptions. *Forest Products Journal*, 1998, vol. 48, iss. 9, pp. 81–86.
96. Wang J., LeDoux C.B. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production through Computer Simulation. *Forest Science*, 2003, vol. 49, iss. 1, pp. 64–76. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.64>
97. Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Modeling and Simulating Two Cut-to-Length Harvesting Systems in Central Appalachian Hardwoods. *Proceedings of the 26th Annual Meeting of Council on Forest Engineering*. Maine, Bar Harbor, 2003. 5 p.

98. Wang J.X., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods. *International Journal of Forest Engineering*, 2005, vol. 16, iss. 2, pp. 11–27. <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>
99. Wang J., Li Y., Miller G. Development of a 3D Stand Generator for Central Appalachian Hardwood Forests. *Proceedings of the IUFRO Conference on Symposium on Statistics and Information Technology in Forestry*. Virginia, Blacksburg, 2002. 5 p.
100. Webster D.B. Development of a Flexible Timber Harvesting Simulation Model. *Forest Products Journal*, 1975, vol. 25, iss. 1, pp. 40–45.
101. Wester F., Eliasson L. Productivity in Final Felling and Thinning for a Combined Harvester-Forwarder (Harwarder). *International Journal of Forest Engineering*, 2003, vol. 14, iss. 2, pp. 45–50. <https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702477>
102. Winsauer S.A. A Program and Documentation for Simulation of a Tracked Feller/Buncher. *Research Paper NC-192*. US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1980. 29 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-192>
103. Winsauer S.A. A Program and Documentation for Simulation of Grapple Skidders and a Whole-Tree Chipper. *Research Paper NC-221*. Maine, St. Paul, US Department of Agriculture, Forest Service, 1982. 10 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-221>
104. Winsauer S.A., Bratley D.P. A Program and Documentation for Simulation of a Rubber-Tired Feller-Buncher. *Research Paper NC-212*. Maine, St. Paul, US Department of Agriculture, Forest Service, 1982. 14 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-212>
105. Winsauer S.A., Kofman P.D. Simulation of the Kockums 81-11 Feller/Buncher. *American Society of Agriculture Engineers*. Illinois, Chicago, Hyatt Regency, 1986. 11 p.
106. Ylimäki R., Väätäinen K., Lamminen S., Sirén M., Ala-Ilomäki J., Ovaskainen H., Asikainen, A. Kuljettajaa Opastavien Järjestelmien Tarve ja Hyötypotentiali Koneellisessa Puunkorjuussa = The Need for and Benefit Potential of Operator Guidance Systems in Mechanized Harvesting. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*, 2012. 224 p.

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

Научная статья

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-164-176

Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов

С.В. Посыпанов^{1✉}, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

С.П. Карпачев², *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

В.И. Клевеко³, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.posypanov@narfu.ru[✉]

²Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; karpachevs@mail.ru

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, просп. Комсомольский, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; vlivkl@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.24 / Одобрена после рецензирования 12.09.24 / Принята к печати 14.09.24

Аннотация. При больших расстояниях доставки круглых лесоматериалов зачастую экономически оправданной является только транспортировка в плотках. Преобладает береговая сплотка лесосплавных пучков. Для повышения их прочности, увеличения полндревесности, предполагающего снижение затрат на буксировку, предусматривается торцевание пучков. В формулах, полученных ранее для определения усилия торцевания, отсутствует коэффициент формы пучка – основной критерий, по которому на лесосплаве оценивают противодействие продольному перемещению лесоматериалов. Дополнительное давление в пучке, обусловленное наличием обвязок, не учитывалось, либо не имело непосредственной связи с коэффициентом формы. Цель исследования – выведение формул для вычисления силы торцевания пучков на береговых складах с учетом наличия обвязок и коэффициента формы; установление характера и степени влияния определяющих ее факторов. Метод – теоретический, базирующийся на положениях теорий гибких нитей и сыпучей среды. Аналитическим путем получена формула для нахождения рассматриваемого усилия. Ее использование в практических расчетах проблематично из-за необходимости многократного вычисления интегралов. Составляющие формулы, требующие вычисления интегралов, заменили параметром K – параметром сопротивления торцеванию. Его значение, соответствующее площади поперечного сечения пучка, равной единице, обозначили k – удельный параметр сопротивления торцеванию. Установили, что этот показатель зависит от коэффициента формы пучка и отношения его высоты к среднему диаметру лесоматериалов. Изменяя данные факторы в диапазонах 1,5–2,5 и 4–20 соответственно, выполнили вычисления k с использованием указанных интегралов. Получили аппроксимирующие зависимости для определения параметра k по отношению высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов, построили графики, позволяющие определять усилие торцевания при практических расчетах, не прибегая к интегрированию. Установили, что изменение от-

ношения высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов от 4 до 20 вызывает примерно 5-кратное увеличение усилия торцевания, зависимость линейная. Уменьшение коэффициента формы от 2,5 до 1,5 приводит к росту этого усилия почти в 2 раза. Его зависимость от плотности лесоматериалов, коэффициента полндревесности, размеров пучка и коэффициента трения скольжения прямая, линейная. Из этих факторов наиболее значим коэффициент трения, варьирование которого может приводить к изменению выходной величины более чем в 2 раза. Ее зависимость от угла внутреннего трения обратная, незначительная.

Ключевые слова: лесосплав, плот, береговой склад, торцевание пучков, сила торцевания

Для цитирования: Посыпанов С.В., Карпачев С.П., Клевеко В.И. Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 164–176. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-164-176>

Original article

Calculated Forces during Cross-Cutting of Rafting Bundles in Coastal Warehouse Conditions

Sergey V. Posypanov¹, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Sergey P. Karpachev², Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

Vladimir I. Kleveko³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

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

²Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; karpachevs@mail.ru

³Perm National Research Polytechnic University, prosp. Komsomolsky, 29, Perm, 614990, Russian Federation; vlivkl@mail.ru

Received on June 18, 2024 / Approved after reviewing on September 12, 2024 / Accepted on September 14, 2024

Abstract. For long distances of round timber delivery, transport in rafts is often the only economically viable option. The bank bundling of logs predominates. To increase their strength and solid-volume ratio, which implies a reduction in towing costs, cross-cutting of the bundles is provided. The formulas obtained earlier for determining the cutting force do not include the bundle shape coefficient – the main criterion by which the resistance to the longitudinal movement of timber is evaluated during timber rafting. The additional pressure in the bundle due to the presence of strapping has not been taken into account, or has had no direct relationship with the shape factor. The aim of this research has been to derive formulas for calculating the force of cross-cutting of bundles at coastal warehouses, taking into account the presence of strapping and the shape factor, as well as to establish the nature and degree of influence of the factors determining it. The research method has been theoretical, based on the principles of theories of flexible threads and granular media. A formula for calculating the force in question has been obtained analytically. Its use in practical calculations is



problematic due to the need for multiple calculations of integrals. The formula components that require the calculation of integrals have been replaced by the K parameter – the parameter of resistance to cross-cutting. Its value, corresponding to the cross-sectional area of the bundle equal to one, has been designated k – the specific parameter of resistance to cross-cutting. It has been established that this indicator depends on the shape factor of the bundle and the ratio of its height to the average diameter of the log. By varying these factors in the ranges of 1.5–2.5 and 4–20, respectively, k calculations have been performed using the specified integrals. Approximating dependencies have been obtained for determining the k parameter based on the ratio of the bundle height to the average diameter of the log, and graphs have been constructed that make it possible to determine the cutting force in practical calculations without resorting to integration. It has been found that changing the ratio of the bundle height to the average diameter of the log from 4 to 20 causes an approximately 5-fold increase in the cutting force, the relationship is linear. A decrease in the shape factor from 2.5 to 1.5 leads to an increase in this force by almost 2 times. Its dependence on the density of timber, the solid-volume ratio, the size of the bundle and the coefficient of sliding friction is direct and linear. Of these factors, the most significant is the friction coefficient, the variation of which can lead to a change in the output value by more than 2 times. Its dependence on the angle of internal friction is inverse and insignificant.

Keywords: timber rafting, raft, coastal warehouse, cross-cutting of bundles, cutting force

For citation: Posypanov S.V., Karpachev S.P., Kleveko V.I. Calculated Forces during Cross-Cutting of Rafting Bundles in Coastal Warehouse Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 164–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-164-176>

Введение

Расстояние транспортировки древесного сырья от лесозаготовителей до крупных переработчиков постоянно увеличивается. Во многих случаях такая транспортировка является экономически оправданной только при использовании наиболее дешевого водного транспорта. В настоящее время доставка лесоматериалов по воде осуществляется в плотках либо судами. Плоты формируются в основном на затопляемых плотбищах, т. е. преобладает береговая сплотка лесоматериалов. Как при традиционных технологиях береговой сплотки [8], так и при альтернативных [11, 12] предусмотрено торцевание лесосплавных пучков. Это способствует увеличению их продольной прочности. В результате торцевания повышается коэффициент полндревесности самих пучков и плота в целом, что снижает удельные затраты на буксировку лесотранспортных единиц. При решении вопросов, связанных с торцеванием лесосплавных пучков, важно знать величину усилий, необходимых для его осуществления, факторы, определяющие эту величину, характер и степень их влияния.

Исследованиям торцевания групп круглых лесоматериалов посвящен ряд работ [1–6, 13]. В большинстве из них предполагалось отсутствие или не принималось во внимание наличие обвязок, которое увеличивает контактные силы между круглыми лесоматериалами в пучке, особенно при малых коэффициентах его формы, что, в свою очередь, обуславливает повышение усилия торцевания. Из всех рассмотренных работ лишь в [3] влияние обвязок учтено посредством введения понятия дополнительного слоя лесоматериалов. Ни в одном источнике в расчетных формулах среди факторов, влияющих на усилие торцевания, нет коэффициента формы пучка. А это основной критерий на ле-

сосплаве, по которому оценивают противодействие продольному перемещению лесоматериалов в пучке. Данные факты свидетельствуют о целесообразности выполнения описываемого здесь исследования.

Цель исследования – получение формул для вычисления силы торцевания лесосплавного пучка в условиях берегового склада с учетом наличия обвязок на пучке и его коэффициента формы; установление характера и степени влияния определяющих факторов на величину этой силы.

Объектом изучения является лесосплавной пучок. Используемый метод – теоретический, основанный на использовании положений теорий гибких нитей и сыпучей среды.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуя взаимодействия между круглыми лесоматериалами в пучке в поперечном направлении, рассматривали их совокупность как сыпучую среду [14, 16, 19]. Учитывали, в частности, что для групп лесоматериалов, например для штабелей, используются такие понятия как угол естественного откоса, угол внутреннего трения, характерные для сыпучей среды.

Полагаем, что пучок сформирован из лесоматериалов одинакового диаметра, соответствующего среднему в реальной сплочной единице. Они расположены горизонтальными рядами. Отметим, что во всех рассмотренных работах по данной теме эти допущения также принимались. Очевидно, что диаметры лесоматериалов разнообразны, как и их расположение в пучке. Они имеют случайный характер. Учесть это разнообразие практически нереально. Оперирование средними диаметрами отчасти приближает используемую модель к реальным вариантам. Указанные допущения обеспечивают решаемость задачи, позволяют выявить наиболее важные закономерности, оценить усилие торцевания.

Рассматриваемую сыпучую среду разделим на горизонтальные слои, толщина которых равна среднему диаметру лесоматериалов. Один из слоев изображен на расчетной схеме (рис. 1) в виде заштрихованной полосы.

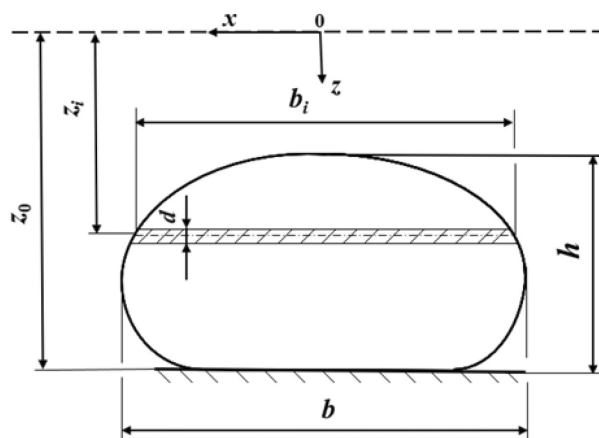


Рис. 1. Расчетная схема поперечного сечения лесосплавного пучка

Fig. 1. The design diagram of the cross-section of a rafting bundle

В результате действия гравитационной силы в сыпучей среде имеет место вертикальное давление соответствующего направления. На уровне горизонтальной оси i -го слоя оно может быть вычислено (Па) по формуле

$$p_{vi} = z_i \rho g \delta, \quad (1)$$

где z_i – аппликата горизонтальной оси i -го слоя, отмеряемая от линии нулевого давления сыпучей среды, м; ρ – плотность круглых лесоматериалов, кг/м³; g – гравитационная постоянная, м/с²; δ – коэффициент полнодревесности лесосплавного пучка.

Наличие указанного давления вызывает в сыпучей среде т. н. распорное, или горизонтальное, давление. На том же уровне оно может быть определено (Па) из выражения

$$p_{ri} = z_i \rho g \delta \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения для круглых лесоматериалов, рассматриваемых как сыпучая среда, ...°.

Согласно формуле (1), вертикальное давление увеличивается сверху вниз по линейному закону. По формуле (2) аналогичный вывод можно сделать и для горизонтального давления. То есть силы давления, действующие на круглый лесоматериал слева и справа, снизу и сверху, определяются по средним значениям соответствующих давлений на высоте оси слоя. Вертикальная составляющая усилий, приложенных к круглому лесоматериалу в поперечном направлении (Н)

$$P_{vi} = z_i \rho g \delta L d; \quad (3)$$

горизонтальная составляющая (Н)

$$P_{ri} = z_i \rho g \delta \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) L d, \quad (4)$$

где L – длина пучка, м; d – средний диаметр лесоматериалов, м.

Продольному перемещению круглых лесоматериалов в пучке противодействует сила трения. Величина этой силы для одного круглого лесоматериала в i -м слое может быть установлена из выражения (5), полученного с помощью формул (3), (4).

$$P_{li} = 2 z_i \rho g \delta L d f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right), \quad (5)$$

где f – коэффициент трения скольжения при перемещении круглых лесоматериалов относительно друг друга в продольном направлении.

Количество круглых лесоматериалов в слое считаем равным отношению ширины слоя по оси b_i к диаметру лесоматериалов d . Умножение полученного значения на коэффициент ψ , определяющий долю лесоматериалов, подлежащих торцеванию с одной стороны пучка, дает расчетное количество таких лесоматериалов в слое. С принятием во внимание этих положений и формулы (5) получили выражение для установления торцующего усилия, прикладываемого к лесоматериалам одного слоя, которое привели к виду

$$P_{с.лi} = 2 z_i b_i \rho g \psi \delta L f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right).$$

Сумма этих усилий по всем слоям дает величину торцующего усилия P_t для лесосплавного пучка в целом. Записали соответствующее выражение, вы-

нося за знак суммы множители, которые принимаются постоянными для данного лесосплавного пучка, под знаком суммы оставили величины, меняющиеся от слоя к слою, и множители, постоянные для всех пучков:

$$P_{\tau} = \psi \rho \delta L f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) \sum_{i=1}^m 2 g z_i b_i, \quad (6)$$

где m – количество слоев.

Ввели обозначение

$$K = \sum_{i=1}^m 2 g z_i b_i. \quad (7)$$

Величину K назвали параметром сопротивления торцеванию. С использованием введенного обозначения формулу (6) можно записать следующим образом:

$$P_{\tau} = \psi \rho \delta L f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) K. \quad (8)$$

Произведение $2g$ в рассматриваемых условиях остается неизменным. Таким образом, на K , согласно выражению (7), влияют только количество слоев; аппликаты осей слоев и их ширины по осям, которые, в свою очередь, зависят от размеров и формы поперечного сечения пучка и количества слоев.

Рассмотрим поперечное сечение лесосплавного пучка, площадью 1. Удельное, т. е. соответствующее единичной площади, K обозначим символом k и назовем удельным параметром сопротивления торцеванию. Линейные характеристики сечения в этом случае будут безразмерными. Форму поперечного сечения пучка на лесосплаве описывают коэффициентом C , равным отношению ширины к высоте сплочной единицы. Поскольку высоту слоя мы приняли равной среднему диаметру лесоматериалов, количество слоев определяется из выражения

$$m = H/d,$$

где H – высота пучка, м.

Для пучка с единичной площадью сечения указанную высоту обозначим символом h .

Выполненный анализ показал, что k определяется коэффициентом C и количеством слоев m , т. е. отношением h/d . Исходя из обычно применяемых в практике лесосплава геометрических характеристик пучков и диаметров сплавляемых круглых лесоматериалов, ориентировались на диапазоны варьирования для коэффициента формы 1,5–2,5, для количества слоев – 4–20.

Наиболее точно форма поперечного сечения лесосплавного пучка описывается с использованием положений теорий гибких нитей [7] и сыпучей среды. При этом пучок рассматривается как гибкая оболочка, заполненная, как было отмечено, сыпучей средой. Функцию оболочки в данном случае выполняют обвязки пучка – аналоги гибких нитей. Их форма соответствует форме поперечного сечения пучка. Она описывается 2 параметрическими уравнениями [18]:

$$x = 0,5 z_0 \left((2 - \sin 2\Theta) \left(K(\Theta) - F(\Theta, \alpha) - 2 \left(E(\Theta) - E(\Theta, \alpha) \right) \right) \right); \quad (9)$$

$$z = z_0 \sqrt{1 - \sin^2 \Theta \sin^2 \alpha}, \quad (10)$$

где z_0 – аппликата основания пучка, м; Θ – угол, характеризующий форму гибкой нити, ...°; $K(\Theta)$ и $F(\Theta, \alpha)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 1-го рода; $E(\Theta)$ и $E(\Theta, \alpha)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 2-го рода [15]; α – параметр тонкой нити, изменяющийся по ее длине, ...° [7].

При исследовании геометрических параметров 2-ярусных 4-пакетных пучков с помощью уравнений, аналогичных (9), (10), с использованием численного метода нами получены характеристики верхних пакетов с единичной площадью поперечного сечения [9]. Часть этих характеристик может быть использована и в рассматриваемом здесь случае (табл. 1).

Таблица 1

Параметры, характеризующие габариты, форму поперечного сечения пучка единичной площади и положение линии нулевого давления
The parameters characterizing the dimensions, cross-sectional shape of a unit area bundle and the position of the zero pressure line

Θ, \dots°	z_0	h	b	C
64,33	1,633	0,926	1,309	1,41
71,59	1,263	0,864	1,393	1,61
79,55	0,943	0,772	1,545	2,00
83,04	0,814	0,716	1,655	2,31
84,95	0,742	0,677	1,740	2,57

Для 5 приведенных сечений с коэффициентами формы от 1,41 до 2,57 поочередно выполнили следующие расчеты. Приняв определенное количество слоев m из указанного ранее диапазона, вычисляли высоту слоя, т. е. условный диаметр лесоматериалов по формуле

$$d = h/m. \quad (13)$$

Аппликату оси 1-го, т. е. нижнего слоя пучка, устанавливали из выражения

$$z_1 = z_0 - d / 2. \quad (14)$$

Аппликату оси каждого следующего слоя находили путем вычитания из соответствующей аппликаты предыдущего среднего диаметра d .

Для каждого слоя устанавливали величину параметра α тонкой нити, соответствующего высоте расположения оси слоя. При этом использовали выражение, полученное в результате преобразования формулы (10):

$$\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}{\sin^2 \theta}}.$$

По параметру α и углу Θ , соответствующему данному коэффициенту формы C , с помощью выражения (9) вычисляли абсциссу x для точки, расположенной на тонкой нити и оси рассматриваемого слоя. При этом эллиптические интегралы определяли, используя соответствующие ряды [20]. Ширину оси слоя b_i находили путем умножения полученного значения абсциссы на 2. Для каждого слоя рассчитывали произведение, находящееся в формуле (7) под знаком суммы. Просуммировав эти произведения по всем слоям, вычисляли k

для данного сочетания коэффициента формы и количества слоев. Такие расчеты выполнены при количестве слоев 4, 7, 10, 13, 17, 20 (табл. 2).

Таблица 2

Пример расчета параметра k при $C = 2,31$ и $m = 10$
An example of calculating the k parameter at $C = 2.31$ and $m = 10$

i	z_i	α, \dots°	x_i	b_i	$z_i b_i$	$2gz_i b_i, \text{ м/с}^2$
1	0,7782	17,19	0,7284	1,4567	1,134	22,242
2	0,7066	30,01	0,7942	1,5884	1,122	22,021
3	0,6350	39,07	0,8213	1,6427	1,043	20,465
4	0,5634	46,65	0,8265	1,6530	0,931	18,272
5	0,4918	53,40	0,8136	1,6273	0,800	15,702
6	0,4202	59,63	0,7830	1,5659	0,658	12,910
7	0,3486	65,56	0,7321	1,4643	0,510	10,015
8	0,2770	71,32	0,6554	1,3108	0,363	7,124
9	0,2054	77,12	0,5409	1,0818	0,222	4,360
10	0,1338	83,58	0,3591	0,7182	0,096	1,885
k						135,0

Для указанного ряда количества слоев аналогичные расчеты выполнены при 5 различных коэффициентах формы пучка. Получено 30 таблиц, подобных табл. 2. Значения k представлены в табл. 3. Количество слоев m заменено соответствующей величиной h/d , которой удобнее пользоваться в дальнейших расчетах.

Таблица 3

Результаты расчетов k
The results of k value calculations

C	k при различных отношениях $h/d, \text{ м/с}^2$					
	4	7	10	13	17	20
1,42	104,3	180,2	256,4	332,7	434,4	510,8
1,61	80,2	139,0	197,9	256,8	335,5	394,5
2,00	61,1	106,3	151,5	196,7	257,1	302,3
2,31	54,4	92,9	135,0	174,3	228,6	269,6
2,57	51,1	89,1	127,1	165,1	215,8	253,8

Результатом расчетов стал ряд аппроксимирующих выражений. Построены графики связи k и определяющих факторов. Поскольку аппроксимирующие зависимости выведены по теоретическим данным, достоверность аппроксимации во всех случаях очень высокая. Это позволило пересчитать результаты на коэффициенты формы пучка, обычно используемые при выполнении проектных работ и указываемые в нормативных документах. Именно при таких коэффициентах формы могут быть использованы приведенные далее аппроксимирующие зависимости. При $C = 2,50$

$$k = 13,0h/d + 0,4; \quad (11)$$

при $C = 2,25$

$$\text{при } C = 2,00 \quad k = 13,9h/d + 0,6; \quad (12)$$

$$\text{при } C = 1,75 \quad k = 14,8h/d + 0,8; \quad (13)$$

$$\text{при } C = 1,50 \quad k = 17,3h/d + 1,2; \quad (14)$$

$$k = 22,7h/d + 2,2. \quad (15)$$

Достоверность аппроксимации приведенных формул выше 0,98 [17].

При переходе от единичной к произвольной площади поперечного сечения с заданным коэффициентом формы изменяются высота и ширина пучка при сохранении соотношения между ними. Пропорционально изменяются и рассмотренные выше произведения $z_i b_i$ и их сумма. То есть анализируемый параметр будет оставаться пропорциональным площади поперечного сечения ω (м²). Таким образом, переход от удельного параметра к абсолютному осуществляется с помощью выражения

$$K = k \omega.$$

С учетом этого преобразовали формулу (8)

$$P_T = \psi \rho \delta L \omega f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) k. \quad (16)$$

Объем лесосплавного пучка (м³) определяется с помощью выражения

$$V = \delta L \omega;$$

масса (кг) –

$$M = \rho \delta L \omega.$$

Таким образом, формула (16) может быть представлена в виде:

$$P_T = \psi \rho V f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) k \quad (17)$$

или

$$P_T = \psi M f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) k. \quad (18)$$

При вычислении усилия торцевания лесосплавного пучка необходимо определить k по одной из формул (11)–(15), соответствующей расчетному коэффициенту C . Далее следует воспользоваться выражением (16). Можно также применить формулу (17) или (18).

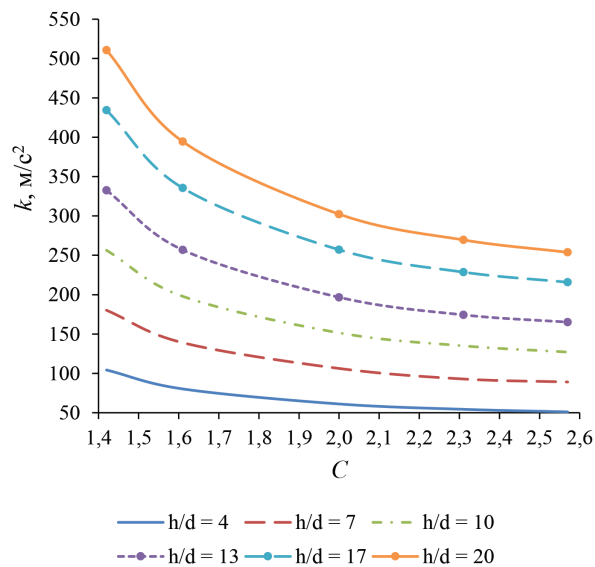
При подобных расчетах коэффициент ψ обычно принимают равным 0,5, т. е. ориентируются на наиболее неблагоприятный случай, когда выдвинуты все лесоматериалы пучка, одна половина из них с одной стороны, вторая – с другой.

Анализируя полученные формулы, установили, что усилие, необходимое для торцевания лесосплавного пучка, линейно возрастает с увеличением его высоты и ширины, длины лесоматериалов, их плотности, коэффициента полндревесности. Степень влияния каждого из перечисленных факторов можно оценить по диапазону его изменения. Лесосплавные пучки сплачивают в основном из еловых и сосновых сортиментов. Их плотность в свежесрубленном состоянии находится обычно в диапазоне 750–850 кг/м³. Коэффициент полндревесности принимают 0,56–0,70, он увеличивается с повышением сред-

него диаметра лесоматериалов. Указанные факторы определяют массу пучка, соответственно, усилие торцевания линейно возрастает с увеличением этой массы. Оно также линейно повышается с увеличением коэффициента трения. Эта зависимость весьма существенна, т. к. указанный коэффициент может изменяться в 2,5 раза. Коэффициент трения при продольном относительном смещении круглых лесоматериалов принимают 0,5, в воде или после выгрузки из воды – 0,2 [10]. Согласно [10], угол внутреннего трения для еловых круглых лесоматериалов – 29° , для сосновых – 26° . Зависимость от этого фактора более сложная. Уменьшение угла от 29° до 26° приводит к увеличению суммы в скобках в формуле (11), а значит, и усилия торцевания лишь на 3–4 %. Судя по виду аппроксимирующих зависимостей (11)–(15), k и, соответственно, усилие торцевания также линейно возрастают с увеличением отношения высоты пучка к диаметру лесоматериалов. Эта зависимость очень значительна. Изменение указанного отношения от 4 до 20 приводит почти к 5-кратному росту k и усилия торцевания. В другой интерпретации, чем меньше диаметр лесоматериалов при прочих равных условиях, тем больше усилие торцевания пучка. Также очень существенно влияет на выходную величину коэффициент формы пучка C . Усилие торцевания увеличивается с уменьшением указанного коэффициента (рис. 2). Уменьшение коэффициента формы от 2,5 до 1,5 обуславливает рост выходной величины примерно в 2 раза. По графикам рис. 2 видно, что в области малых коэффициентов изменение выходной величины более интенсивно.

Рис. 2. Зависимость параметра k от коэффициента формы пучка C

Fig. 2. The dependence of the k parameter on the C bundle shape coefficient



Отметим, что при практических расчетах этими графиками можно воспользоваться для определения k в случаях, для которых выражения (11)–(15) не применимы.

Сравнение результатов, вычисленных по полученным нами формулам, и наиболее известной формуле [10], рекомендуемой для лесосплавных пучков, торцуемых на береговых складах, в которой не учитывается наличие обвязок и отсутствует явная связь выходной величины с коэффициентом формы, показало следующее. При коэффициенте формы 2,5, т. е. при относительно слабом натя-

жении обвязок, показатель, установленный по предложенным здесь формулам, при равных прочих условиях больше примерно на 10 %. При коэффициенте $C = 2,0$ это превышение составляет 26 %, при $C = 1,75$ – 47 %, при $C = 1,5$ – 94 %. Это сравнение наглядно демонстрирует достоверность результатов описанного здесь исследования.

Выводы

1. Основываясь на положениях теорий сыпучей среды и гибких нитей, аналитическим путем получили формулу для вычисления усилия торцевания лесосплавных пучков в условиях берегового склада с учетом наличия обвязок на пучке и его коэффициента формы. Применение этой формулы в практических расчетах проблематично в связи с необходимостью многократного вычисления эллиптических полных и неполных интегралов 1-го и 2-го родов. Составляющие формулы, требующие вычисления интегралов, заменили параметром K . Ввели понятие удельного параметра k , соответствующего единичной площади поперечного сечения пучка.

2. Установили, что параметр k зависит от коэффициента формы пучка и от отношения высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов. Изменяя эти факторы в диапазонах 1,5–2,5 и 4–20 соответственно, с использованием указанных интегралов вычислили k . По результатам вычислений для коэффициентов формы пучка, обычно используемых при выполнении проектных работ и указываемых в нормативных документах, получили аппроксимирующие зависимости, позволяющие определять значения параметра k по отношению высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов. Кроме того, построили графики зависимости, позволяющие определять k , не прибегая к сложным вычислениям, связанным с интегрированием.

3. С помощью полученных аппроксимирующих и аналитических зависимостей оценили влияние определяющих факторов на выходную величину. Наиболее существенно на нее воздействует отношение высоты пучка к диаметру лесоматериалов. Изменение этого фактора от 4 до 20 вызывает примерно 5-кратное увеличение усилия торцевания, зависимость линейная. Весьма существенно влияние коэффициента формы пучка. Его уменьшение от 2,5 до 1,5 приводит примерно к 2-кратному увеличению выходной величины. Зависимость усилия торцевания от плотности лесоматериалов, коэффициента полндревесности пучка, его габаритных размеров, коэффициента трения скольжения прямая, линейная. Из перечисленных здесь факторов наиболее существенно воздействует коэффициент трения, изменение которого может приводить к соответствующему изменению выходной величины более чем в 2 раза. Зависимость усилия торцевания от угла внутреннего трения, который определяется в основном породой сортиментов, обратная, незначительная.

4. Сравнили результаты вычислений по полученным нами формулам и формуле, в которой не учитывается наличие обвязок и отсутствует связь выходной величины с коэффициентом формы. При коэффициенте формы 2,5, т. е. при относительно слабом натяжении обвязок, результат, рассчитанный по предложенным здесь формулам, больше примерно на 10 %. При коэффициенте 2,0 – на 26 %, при 1,75 – на 47 %, при 1,5 – на 94 %.

5. Итоги исследования позволяют на практике рассчитать усилие торцевания лесосплавных пучков, свободно лежащих на твердом основании, учитывая наличие обвязок и принимая во внимание коэффициент формы – важнейшую характеристику этих лесотранспортных единиц. Информация о влиянии определяющих факторов дает возможность принимать наиболее рациональные технические и технологические решения при рассмотрении вопросов, связанных с торцеванием лесосплавных пучков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Борисов М.В. К вопросу определения усилий торцевания пачек (пакетов) бревен // Тр. ВКНИИВОЛТ. 1971. Вып. X. С. 13–19.

Borisov M.V. On the Issue of Determining the Forces of Cross-Cutting of Bundles (Packages) of Logs. *Proceedings of the Volga-Kama Research and Design and Technological Institute of Water Forest Transport*, 1971, iss. 10, pp. 13–19. (In Russ.).

2. Войтко П.Ф. Методика и результаты производственных испытаний передвижных и переносных торцевывающих устройств на рейдах приплава лесопромышленных предприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. № 5. С. 69–77.

Vojtko P.F. Technique and Results of Production Testing of Mobile and Portable Butt Edgers in Log Receiving Ports of Forest-Industrial Enterprises. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2004, no. 5, pp. 69–77. (In Russ.).

3. Войтко П.Ф. Совершенствование процессов выгрузки лесоматериалов с воды и их торцевание на рейдах приплава: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Йошкар-Ола, 2005. 39 с.

Vojtko P.F. *Improving the Processes of Unloading Timber from Water and Their Cross-Cutting at the Log Receiving Ports*: Doc. Tech. Sci. Diss. Abs. Yoshkar-Ola, 2005. 39 p. (In Russ.).

4. Войтко П.Ф., Фадеев А.С. Математические модели формирования лесных грузов гравитационными торцевывающими устройствами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 57–65.

Voitko P.F., Fadeev A.S. Mathematical Models of Forest Cargo Formation by Gravitational Trimmers. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2003, no. 4, pp. 57–65. (In Russ.).

5. Грубов С.М. Экспериментальное и теоретическое определение некоторых статистических коэффициентов сопротивления перемещению неокоренной древесины. М.: ЦНИИМЭ, 1971. 118 с.

Grubov S.M. *Experimental and Theoretical Determination of Some Statistical Coefficients of Resistance to Displacement of Unbarked Wood*. Moscow, Central Research Institute of Mechanization and Power Engineering of the Forest Industry, 1971. 118 p. (In Russ.).

6. Донской И.П., Виноградов Я.И. Усилия выравнивания торцов пакетов бревен // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1974. Вып. 111. С. 13–17.

Donskoj I.P., Vinogradov Ya.I. Forces to Align the Ends of Log Bundles. *Logging, Timber Storage and Timber Transportation: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Leningrad, Forest Engineering Academy, 1974, iss. 111, pp. 13–17. (In Russ.).

7. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.

Merkin D.R. *Introduction to Flexible Filament Mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 240 p. (In Russ.).

8. Пятакин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.

Patyakin V.I., Dmitriev Yu.Ya., Zajtsev A.A. *Water Transport of Timber*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 336 p. (In Russ.).

9. Посыпанов С.В. Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплотовой единицы, расположенной на твердом основании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 135–147.

Posypanov S.V. Dimensional Determination of a Two-Storied Package Rafting Unit Placed on a Solid Basement. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 5, pp. 135–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.135>

10. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с.

Reutov Yu.M. *Calculations of Bundles (Packages) of Round Timber*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 152 p. (In Russ.).

11. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 1. С. 45–52.

Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Experience of Introducing Transport Package instead of Drift Floating. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2007, no. 1, pp. 45–52. (In Russ.).

12. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Ресурсы отдаленных лесных массивов и возможность их освоения сплавом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 30–36.

Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Resources of Remote Forestland and Possibility of Their Development by Rafting. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2008, no. 2, pp. 30–36. (In Russ.).

13. Фадеев А.С. Обоснование параметров гравитационного торцевыравнивателя с поворотными щитами для формирования пачек круглых лесоматериалов: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 1999. 249 с.

Fadeev A.S. *Justification of the Parameters of a Gravity End Leveler with Rotary Shields for Forming Bundles of Round Timber*: Cand. Tech. Sci. Diss. Yoshkar–Ola, 1999. 249 p. (In Russ.).

14. Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Soil Mechanics*: 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).

15. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientist*: 2nd ed., revised. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1971, vol. 67. 360 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-65138-0>

16. Craig R.F. *Soil Mechanics*: 6th ed. London, New York: E. & F.N. Spon, 1997. 485 p.

17. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS*: 3rd ed. London, SAGE Publications Ltd, 2009. 856 p.

18. Tölke F. Parameterfunktionen. *Theta-Funktionen und spezielle Weierstraßsche Funktionen. Praktische Funktionenlehre*: vol. 2. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1966, pp. 83–115. (In Germ.). https://doi.org/10.1007/978-3-642-51616-0_3

19. Verruijt A. *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, 2012. 331 p.

20. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course of Modern Analysis*: 4th ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1996. 620 p.

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Обзорная статья

УДК 630*1/630*9:674:676

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-177-196

Лесопромышленный комплекс и процесс техногенеза

А.Б. Дягилева, д-р хим. наук, доц.; ResearcherID: [AAF-4459-2021](https://orcid.org/0000-0001-5983-4550),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5983-4550>

А.И. Смирнова[✉], канд. хим. наук, доц.; ResearcherID: [AAF-4016-2021](https://orcid.org/0000-0001-6429-1490),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6429-1490>

П.И. Ленивец, аспирант; ResearcherID: [KHY-2984-2024](https://orcid.org/0009-0003-2790-7577),


ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2790-7577>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; abdiag@mail.ru, smirnova_nasty87@mail.ru[✉], lenivcev-pavel@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.04.24 / Одобрена после рецензирования 08.07.24 / Принята к печати 10.07.24

Аннотация. Анализ природоохранной деятельности предприятий лесопромышленного комплекса по данным из открытых источников и по опыту экспертной оценки негативного воздействия ряда промышленных объектов, перерабатывающих биомассу древесины, позволил описать механизмы влияния интегрального вида хозяйственной деятельности на современный техногенез. Выделены группы техногенеза, свойственные для естественных ландшафтно-геохимических процессов в зоне влияния предприятий лесопромышленного комплекса: биогенез, гидрогенез, гуматогенез, хелатогенез и антропогенез. При промышленной эксплуатации леса меняется ядро лесного биогеоценоза и специфический комплекс растений нижнего яруса, определяющий биогенную миграцию. Рассмотрены особенности проявления гидрогенеза, сопряженные с изменением действия воды и ее проникновением в литосферу. Проявления гуматогенеза и хелатогенеза проанализированы с позиции изменения содержания углерода в лесных подстилках. Установлено, что источниками антропогенеза являются объекты технической инфраструктуры и хозяйственной деятельности, которые сопряжены с оборотом и переработкой древесного сырья, что способствует изменению характера миграции, аккумуляции химических веществ в различных средах и формированию биогеохимических барьеров на их пути. Отмечается особый тип «экономической урбанизации» на современном этапе общественного развития, в которой участвует лесопромышленный комплекс как переработчик растительного сырья и поставщик готовой продукции с генерацией отходов в городских агломерациях с их возможной последующей переработкой. Выделено несколько предполагаемых механизмов техногенеза на различных этапах развития хозяйственной деятельности в лесном секторе. Подчеркнута значительная роль деградиационного механизма. Современная ориентация природопользования и развитие модифицирующих механизмов техногенеза, таких как поддерживающий, креативный и управляющий (наиболее перспективный для реализации циркулярной экономики) и их сочетание в процессе эксплуатации территории открывают новые возможности. Даны прогнозы перспективности перехода от традиционно воспринимаемого техногенеза (преимущественно деградиационного) к ноотехногенезу. Этот переход основан на реализации принципов управляемой природно-технической системы с учетом динамики восстановления и регулирования воспроизводства лесных ресурсов в условиях экологических ограничений, что является залогом устойчивого лесопромышленного комплекса.

© Дягилева А.Б., Смирнова А.И., Ленивец П.И., 2025

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

Ключевые слова: природно-технический комплекс, экосистема, древесное сырье, лесопромышленный комплекс, техногенез, протогенез, ноотехногенез

Для цитирования: Дягилева А.Б., Смирнова А.И., Ленивцев П.И. Лесопромышленный комплекс и процесс техногенеза // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 177–196. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-177-196>

Review article

Timber Industry and the Process of Technogenesis

Alla B. Dyagileva, Doctor of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAF-4459-2021](https://orcid.org/0000-0001-5983-4550),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5983-4550>

Anastasiya I. Smirnova[✉], Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAF-4016-2021](https://orcid.org/0000-0001-6429-1490), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6429-1490>

Pavel I. Lenivtsev, Postgraduate Student; ResearcherID: [KHY-2984-2024](https://orcid.org/0009-0003-2790-7577),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2790-7577>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; abdiag@mail.ru, smirnova_nasty87@mail.ru[✉], lenivtsev-pavel@rambler.ru

Received on April 22, 2024 / Approved after reviewing on July 8, 2024 / Accepted on July 10, 2024

Abstract. An analysis of the environmental protection activities of timber industry enterprises based on data from open sources and on the experience of expert assessment of the negative impact of a number of industrial facilities processing wood biomass has made it possible to describe the mechanisms of influence of an integrated type of economic activity on the modern technologies. The groups of technogenesis characteristic of natural landscape and geochemical processes in the zone of influence of timber industry enterprises have been identified, those being biogenesis, hydrogenesis, humatogenesis, chelation and anthropogenocenosis. During the industrial exploitation of forests, the core of the forest biogeocenosis and the specific complex of plants of the lower tier, which determines biogenic migration, change. The features of the manifestation of hydrogenesis associated with a change in the action of water and its penetration into the lithosphere have been considered. The manifestations of humatogenesis and chelation have been analyzed from the perspective of changes in the carbon content in forest litter. It has been established that the sources of anthropogenocenosis are objects of technical infrastructure and economic activity that are associated with the turnover and processing of wood raw materials, which contributes to a change in the nature of migration, accumulation of chemicals in various environments and the formation of biogeochemical barriers in their path. There is a special type of “economic urbanization” at the present stage of social development, in which the timber industry participates as a processor of plant raw materials and a supplier of finished products with waste generation in urban agglomerations with their possible subsequent processing. Several possible mechanisms of technogenesis at various stages of the development of economic activity in the forestry sector have been identified. The significant role of the degradation mechanism has been emphasized. The modern nature management orientation and development of modifying mechanisms of technogenesis, such as supportive, creative and managing (the most promising for the implementation of a circular economy) and their combination in the process of exploitation of the territory open



up new opportunities. Forecasts have been provided on the prospects of the transition from the traditionally perceived technogenesis (mainly degradation) to nootechnogenesis. This transition is based on the implementation of the principles of a managed natural-technical system, taking into account the dynamics of restoration and regulation of reproduction of forest resources under environmental restrictions, which is the key to a sustainable timber industry.

Keywords: natural-technical complex, ecosystem, wood raw material, timber industry, technogenesis, protogenesis, nootechnogenesis

For citation: Dyagileva A.B., Smirnova A.I., Lenivtsev P.I. Timber Industry and the Process of Technogenesis. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2025, no. 1, pp. 177–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-177-196>

Лесопромышленный комплекс (ЛПК) России представляет собой жестко связанную с окружающей средой природно-техническую систему, в которой в виде технических объектов функционируют особо опасные производственные элементы в окружении видоизмененного ландшафта. Каждому элементу этой системы на всех этапах развития свойственны расчлененность, иерархичность и многочисленность уровней организации специфического воздействия на основные компоненты окружающей среды: ландшафт (как водный, так и лесной), водные экосистемы, воздух [25]. В сферу антропогенного влияния ЛПК попадают почвы [15], орнитофауна [37], проявляется снижение общего биоразнообразия [16], страдают другие составные части экосистемы. Несмотря на относительную нейтральность воздействия накопления древесных отходов V класса опасности, их наличие ведет к рискам, прежде всего к возникновению пожароопасных ситуаций, а также затрудняет лесовозобновление и проходимость лесных участков. Удельный показатель отходов кроны на 1 тыс. м³ заготовленной древесины, например, в Забайкальском округе составляет 149–154 т/год, [20] варьирует по различным регионам и может составлять до 250 т/год. Следует особо отметить специфику функционирования временных лесных поселков, где образуются сопутствующие бытовые отходы без организации должного обращения, что при определенных условиях способствует выделению токсичного фильтрата, газов и других вредных продуктов распада отходов в зоне их влияния [32].

Направление хозяйственной деятельности по заготовке и переработке древесины относится к одним из старейших и на протяжении всего исторического этапа использования биомассы древесины человеком оставляло существенный след на генезисе природных экосистем в зоне влияния этих объектов. В последнее время в литературе появилось много информации об исторических аспектах развития целлюлозно-бумажной отрасли на территории нашей страны [31, 33, 34].

Однако лесопромышленный комплекс и хозяйственная деятельность по переработке и использованию лесного ландшафта, делового леса, фито- и биоресурсов значительно старше отрасли по переработке древесины с помощью химических способов получения целлюлозы. И первый механизм преобразования человеком природной среды в ходе ее использования со времен древности может быть обозначен как начальный этап техногенеза – протогенез. Техногенез [2] – это процесс изменения природной среды под воздействием производственной деятельности общества. В соответствии с установившейся практикой природоохранной деятельности в регулировании преобразования биосферы в рамках

ГОСТ 15.5.1.01–78 и последующих нормативных документов по охране окружающей среды техногенный ландшафт определяется как продукт антропогенного действия на ландшафт в зависимости от особенности структуры исходного под воздействием конкретной промышленной деятельности. Для России явление нерационального применения древесины всегда относилось к актуальным вопросам природопользования. Однако после 1990-х гг. наметилась специфическая тенденция супернерационального и спекулятивного использования этого воспроизводимого ресурса, в т. ч. с поджогами лесосечных отходов, что привело к усугублению ситуации в лесных экосистемах, которая требует принципиально новых механизмов обращения с лесными ресурсами для их целевой переработки [43].

С 2016 г. по требованиям приказа Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 июня 2016 г. № 367 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их проведения. Формы технологической карты лесосечных работ. Формы акта осмотра лесосеки и порядка осмотра лесосеки» при выполнении рубки лесных насаждений на участках, предоставленных на праве постоянного (бессрочного) пользования или аренды, необходимо осуществлять мероприятия по охране, защите и воспроизводству лесов, лесосечные работы проводятся в соответствии с лесной декларацией по проекту освоения лесов.

Эксплуатирующим организациям, легально и нелегально вырубаящим лес, выгоднее сжечь лесосечные остатки, чем утилизировать их, либо же избавиться от следов несанкционированной деятельности. В России сфера лесозаготовок долгое время оставалась коррумпированной, о чем свидетельствуют периодически возбуждаемые уголовные дела, в т. ч. по факту лесных пожаров. Отчетные материалы по лесным пожарам за 2023 г. показали, что 99 % причин – это человеческий фактор, и часто заинтересованными в возникновении возгорания лицами являются бизнесмены, приобретатели выгоды от лесозаготовок [22]. Прямые выбросы углерода при пожарах, по данным ряда стран, соизмеримы с выбросами энергетической отрасли [40, 42].

Следует отметить, что в системе лесовосстановления пожары рассматриваются с 2 позиций: в южных регионах причина последующего иссушения почвы и формирования остепененных пустошей [5, 14, 30]; в таежной зоне и зонах вечной мерзлоты при использовании контролируемого выжигания достигается прогревание почвы и удаление (выгорание) подстилки, что повышает минерализацию почвы с последующей активацией лесовосстановления [3]. Улучшение минерализации выжиганием является рискованным мероприятием, которое должно прорабатываться детально, и сегодня есть альтернативные технологические приемы способствования минерализации за счет применения золы от сжигания, например, осадков сточных вод совместно с корой древесно-подготовительных цехов ЛПК [26].

Среднее ежегодное уменьшение площади лесов, по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), прогрессирует и в 2023 г. увеличилось на 3,2 % [50], но при этом не учитывается потеря биоресурсов планеты во всем объеме. Динамика техногенеза в лесных ландшафтах и в водных экосистемах, которая прослеживается по материалам мониторинга, подтверждает прогноз об интенсификации эвтрофикации водоемов (в т. ч. главного источника питьевого водоснабжения Северо-Запада

РФ – Ладожского озера) и изменение видового состава лесообразующих пород в этой зоне, на что обращали внимание российские эксперты на стадии подготовки к реализации конкретных проектов в части развития ЛПК. Сегодня мировое сообщество в лице наших потенциальных партнеров, а главное российская законодательная база после длительного лесного экономического и политического кризисов [38, 39], готовы к поэтапному урегулированию процесса природопользования и достижению экологически сбалансированного лесоведения с получением широкого ассортимента продукции при рациональном использовании ресурсов. Это особенно актуально при смене парадигмы экономического развития и переходе к циркулярной экономике для регионов, где лесные богатства играют существенную роль. В соответствии со сложившимися условиями в новой стратегии природопользования мировое сообщество вынуждено принять следующий этап развития как «Десятилетие ООН по восстановлению экосистем» с предполагаемым переходом к 3 взаимосвязанным лесохозяйственным стратегиям в интересах общества [24, 50]: лесопользованию и созданию экологически чистых производственно-сбытовых цепочек; прекращению процесса обезлесения и сохранению лесов; восстановлению деградированных земель и расширению практики агролесоводства.

Для понимания и разработки механизмов реализации этого процесса необходимо установить основные тенденции техногенеза, сопряженного с поэтапными изменениями в развитии природно-технических систем в лесном секторе, а также для организации работ по переходу к управляемым системам природно-территориального комплекса (ПТК). Целью данной работы являлась систематизация накопленной информации по компонентам окружающей среды, имеющим наиболее значимые проявления, определяющие основные тенденции изменения генеза под воздействием производственной деятельности предприятий ЛПК. Поставлены следующие задачи: выделить основные группы генеза, дать характеристику и отследить их качественную оценку по достоверным источникам информации, установив таким образом динамику их изменения при сложившемся природопользовании на современном этапе.

Как известно, формы естественного генеза и их трансформация в техногенез не менее разнообразны, чем виды деятельности, провоцирующие изменение природных ландшафтно-геохимических процессов в зоне влияния интегрированных предприятий ЛПК. В общем случае такие процессы можно разделить на 4 группы: биогенез, гидрогенез, гуматогенез, хелатогенез.

Биогенез. Первым и наиболее значимым для лесных ландшафтов следует назвать биогенез как процесс, обусловленный синтезом и разложением органического вещества в ландшафтах, биогенной миграцией и аккумуляцией химических компонентов с формированием биогеохимических барьеров. Для лесного комплекса его рассматривают как элемент развития экосистем в рамках концепции биогеоценоза в учении В.Н. Сукачева о типах леса и лесных биогеоценозах [13].

Внешний вид и внутренняя иерархическая организация участков леса, которая попадает под промышленную эксплуатацию и зону влияния ЛПК, является следствием воздействия древостоя, сформированного лесообразующими породами, относящимся к эдификаторам, доминантам. При промышленной эксплуатации леса меняется ядро лесного биогеоценоза и специфический комплекс растений нижнего яруса, определяющих биогенную миграцию, при этом, как

следствие, происходит смена сообщества животных, насекомых и микроорганизмов – естественных сателлитов лесообразующих пород – в конкретных условиях эксплуатируемых лесных ландшафтов.

В зонах рубки при лесозаготовке отмечается изъятие хвойных пород и заполнение пространства малоценными лиственными видами, смена механизма формирования опада и лесной подстилки, в ряде случаев наблюдается эрозия почв, что приводит к затруднению лесовосстановления.

В лесных экосистемах опад древесных растений играет роль регулятора биохимических процессов в почве и способствует консервации органических веществ, что положительно сказывается на последующей взаимосвязи между растениями и почвой. При взаимодействии растительности и почвы происходит перераспределение макро- и микроэлементов из почвенных горизонтов в надземные части растений, а затем возвращение их в почву в виде самоорганизованной структуры растительного опада – лесной подстилки. Подстилка, которая формируется из неразложившегося опада, поддерживает микроклимат, благоприятный для биоты, выступая средой ее обитания. Таким образом, любое изменение баланса в виде опада может оказывать специфическое влияние на процесс техногенеза.

Наличие растительного опада в лесных экосистемах учитывается при формировании моделей оценки по доле его участия в биологическом круговороте, связи с атмосферным CO_2 , что особенно актуально для регулирования климатических изменений в рамках Климатической доктрины РФ (указ Президента РФ от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации») [42, 58].

Большое влияние на цикл углерода в лесах оказывает хозяйственная деятельность человека, прежде всего промышленные рубки, изменяя углеродный баланс экосистемы. Сплошные рубки ведут к потерям почвенного углерода за счет снижения его массы в лесной подстилке и верхних минеральных горизонтах. Вмешательство в лесной покров нарушает естественные для лесных экосистем биогеохимические процессы, определяющие основные потоки парниковых газов. Изменения в газообмене CO_2 значительно варьируют в зависимости от природных и климатических условий. После сплошной вырубki наиболее сильно нарушается верхний горизонт почв – лесная подстилка. Стабильные органические соединения (гемицеллюлоза, целлюлоза) в почве превалируют над легкоразлагаемыми. И только спустя несколько лет трудноразлагаемые компоненты опада (ветошь, сучья, отпад) утрачивают свое анатомическое строение и могут активнее использоваться микробиотой, вовлекаясь в круговорот веществ. Отсутствие равновесия между компонентами лесных экосистем, вызванное сплошными рубками, является причиной дисбаланса между образованием почвенного органического вещества в результате разложения растительного опада и его минерализацией до неорганических соединений, доступных растениям [8, 48, 51, 56].

При активном использовании леса как сырьевой базы изменяется водный баланс расчетных участков лесосеки и территорий, с которыми они имеют тесную гидрологическую связь, что приводит к пересыханию мелких рек, нарушению режима питания крупных водных артерий, а в ряде случаев может наблюдаться процесс заболачивания [7].

Гидрогенез. Процессы, связанные с изменением действия воды и ее проникновением в литосферу в зоне гипергенеза, с растворением, переносом и выделением из растворов различных минеральных веществ на определенной территории, принято рассматривать как проявление гидрогенеза. Он находится в тесном взаимодействии с лесным ландшафтом. Сведение древесного полога, который способен перехватывать до 40 % осадков [23], при активной лесозаготовке провоцирует поступление избыточного количества влаги на поверхность. Это в комплексе со строительством лесных дорог и существенным нарушением лесной подстилки, а также ухудшением водно-физических свойств почвы вызывает резкое увеличение склонового стока, как в период снеготаяния, так и при формировании ливневых потоков. В этом случае происходит увеличение поверхностного стока на 10–20 %, а с территории изъятия лесных насаждений – на 10–50 %, что сопровождается эрозионными процессами (смывом и сносом почвы, оврагообразованием и пр.). Снижение водопроницаемости почвы, большее поступление осадков к ее поверхности, а также уменьшение расходов воды на транспирацию часто способствуют повышению уровня грунтовых вод и верховодки на сплошных вырубках, усилению поверхностного и внутрипочвенного стока в условиях расчлененного рельефа [57].

Необходимо отметить, что при таких условиях следует ожидать роста загрязненности ливневых сточных вод, в которых присутствуют минеральные и органические вещества (в т. ч. нефтепродукты), которые при нарушении гидрологического режима формирования подземного стока напрямую попадают в водные объекты, минуя инфильтрацию в нижние горизонты подземного стока в область традиционного разрешения, характерного для сложившегося ландшафта. Как итог, снижается качество воды в поверхностном водном источнике, что выявляется при системном мониторинге водных объектов. К сожалению, сегодня отсутствует нормирование качества дренажных вод с лесосек и подземных питающих вод в зоне влияния ЛПК, а также в местах рубок под линейные объекты и нефтедобывающие площадки, где почвы и воды подвергаются усиленной биодеградации под воздействием нефтепродуктов [28, 47].

В процессе лесозаготовки на микрорельеф почвы, ее строение и физические свойства сильно влияет способ доставки бревен от места валки на погрузочную площадку. В результате многократных рейсов трактора происходит углубление почвенного покрова, который приобретает корытообразную форму с заметными углублениями в местах прохождения гусениц. Одновременно с этими изменениями резко уменьшается общая капиллярная и некапиллярная скважность почвы и, следовательно, ухудшаются водный, воздушный и тепловой режимы. Было установлено, что при трелевке леса канатной установкой происходит вымывание взвешенных веществ поверхностным стоком в 7,5 раза, а растворенных солей в 5,7 раза меньше, чем при тракторной трелевке [17, 27]. Это необходимо учитывать при организации работ на лесных участках.

В результате пожаров на территориях лесозаготовок снижается кислотность почвенной подстилки и, напротив, повышается кислотность минеральных горизонтов почв. Это сопровождается увеличением содержания обменного кальция, углерода и азота. Таким образом, достигаются кратковременный рост доступности элементов питания, уменьшение биологической активности почв и доли углерода водорастворимых соединений, а также изменение отношения C/N

в подстилке и других горизонтах, испытавших пирогенное влияние [35, 40, 41, 44, 45, 52, 53], что следует принимать во внимание при разработке мероприятий по управлению этими процессами.

Анализ водной и кислотной вытяжек из почв горельников показал наличие тяжелых металлов, марганца, никеля, меди, железа. Причем во всех пробах содержание тяжелых металлов в кислотной вытяжке намного выше, чем в водной, хотя водная вытяжка указывает на их непосредственное воздействие на растения. Термическое разрушение органики проявляется не только в изменении общего содержания тяжелых металлов, но и в соотношении растворимых соединений и связанных комплексов в почвенном слое [18, 46, 55].

При пожарах одновременно увеличивается количество зольных элементов, которые освобождаются преимущественно в форме карбонатов и сульфатов, обладающих значительной растворимостью, также в грунтовых водах растет концентрация неорганических форм азота [36]. В условиях сравнительно медленного восстановления растительного покрова на горячих это создает опасность вымывания и вовлечения в большой геологический круговорот значительной части образуемых растворимых солей. Особенно велика эта опасность при павальных пожарах, когда происходит гибель древостоя, и, следовательно, резко сокращается использование элементов в биологическом круговороте. При этом на восстановление исходного молекулярного состава до предпожарных значений требуется примерно 50 лет.

Особенно необходимо отметить специфику инженерных решений по защите водоемов путем создания устройств для гашения энергии водных потоков на территориях эксплуатации леса. Проектирование придорожных дренажных систем без соблюдения современных требований по организации пассивной системы очистки воды не решает проблему регулирования стока и не может остановить переход гидрогенеза в стадию техногенеза в зоне влияния участков лесозаготовки и промышленных площадок ЛПК. Этот процесс требует более тщательной и комплексной проработки в качестве одного из элементов регулятора генезиса формирования речного стока в системе перехода к управляемым природно-техническим системам нового поколения, к которым следует отнести ЛПК, и механизмы которых предполагается обсуждать в следующих статьях.

В данной работе не рассматривается вопрос использования водных источников для молевого сплава, который долгое время доминировал в практике доставки древесины для переработки и был на определенном этапе запрещен российским законодательством, но это не означает, что такой вид природопользования не оставил негативного следа [4] и не способствовал активному развитию деградационного механизма техногенеза как водных экосистем, так и ландшафтов водосборной системы. Согласно измененному Водному кодексу РФ (гл. 3 ст. 11 п. 9) практика сплава древесины (лесоматериалов) возвращена в систему возможного использования водных объектов (ФЗ № 302-ФЗ от 02.07.2021), и реализация этих процессов будет требовать специального мониторинга, производственного экологического контроля по всему водному пути с разработкой мероприятий по повышению экологической устойчивости водных экосистем, чтобы обеспечить устойчивое развитие территорий в зоне влияния лесозаготовительных и перерабатывающих компаний без топляка, заторов и снижения качества воды в водоемках.

Замена сплава на транспортировку древесного сырья по лесным дорогам, где используются лесовозные автопоезда, снизила негативную нагрузку на лесные экосистемы, но не свела ее на нет. В этом случае изменяется соподчиненность процессов по отрицательному влиянию на ПТК. Процессы проникновения воды и воздуха под воздействием тяжелой техники становятся другими, фильтрационные и обменные свойства почв не отвечают естественным параметрам, что способствует формированию мозаичных участков с зонами высокой преобразованности ландшафта [11]. Следует отметить, что при организации и эксплуатации таких участков в общем балансе эмиссии веществ на водосборной площади возрастает риск возникновения новых маркерных веществ – нефтепродуктов, которые ранее не участвовали в системе трансформации органического вещества. Их появление отмечается при техническом обслуживании машин, при проливах и утечках нефтесодержащих горючих и смазочных материалов, при хранении на делянках, заправке техники, а также в результате аварий при низкой культуре эксплуатации лесных машин [32, 49].

Гуматогенез. Степень гумификации органического вещества в лесных подстилках принято оценивать по содержанию целлюлозы и лигнина [1]. Эти компоненты обладают различными видами устойчивости [9], трансформации и биодеструкции, что делает их основными источниками для формирования гумусовых кислот. По элементному составу гумусовых кислот можно оценить степень их самоорганизации в почвенном слое, которую называют «зрелость» почв, и определить направленность процесса гумификации. Образование и формирование в определенных ландшафтах менее подвижных органоминеральных производных гумусовых веществ (преимущественно с ионами кальция), гетерополярных соединений и поликомпозиционных комплексов с макрокомпонентами принято считать гуматогенезом. Любое изменение содержания углерода в лесных подстилках и, следовательно, в органогенных слоях в ходе его естественной биоаккумуляции нарушают ход гуматогенеза в конкретном ландшафте, что особенно проявляется в зонах сплошных рубок [54].

Хелатогенез. На начальном этапе после рубок отмечается неравномерное формирование органогенного горизонта, который имеет мозаичный характер, а биохимические процессы на различных участках заторможены. В естественных условиях во времени компоненты опада и лесосечные отходы утрачивают анатомическое строение, активно используются микробиотой и вовлекаются в круговорот веществ. С морфологической точки зрения этот процесс выражается этапами разложения органического поликомпозиционного природного материала, переходом к иллювиированию гумуса вниз по профилю. Особенностью здесь является снижение содержания углерода в составе гуминовых и фульвокислот в нижних слоях органогенного горизонта при увеличении их окисленности. Минеральная составляющая подстилок, как правило, неоднородна по мере трансформации органоминеральных комплексов в различных слоях. По мере увеличения минерализации растительного материала повышается подвижность основных элементов-органогенов: Ca, K, P, Mg, S, Mn – и их концентрации в комплексах, а количество Al, Fe и Si возрастает. Если процесс спровоцировать в зоне сплошной рубки, то будут наблюдаться ускоренные образование и накопление в ландшафтах ненасыщенных комплексных алюмо- и железогумусовых кислот и на их основе адсорбционных – органоминеральных структур, что

принято квалифицировать как хелатогенез. Такие процессы наиболее активно проявляются для ландшафтов кислого и глеевого классов водной миграции (Северо-Западный регион) [1, 8].

Антропогенноценоз. Методология критических нагрузок, экологический риск, мониторинг этих процессов и системный анализ геохимии биосферы как основного механизма формирования современной ноосферы сегодня в комплексе рассматриваются в качестве теоретической платформы для разработки путей планового регулирования рационального природопользования, т. е. создания управляемого техногенеза для обеспечения безопасного проживания населения. При ограниченности невозпроизводимых ресурсов и лимитированном росте воспроизводимых запасов для понимания особенностей построения нового уклада экономики устойчивого развития в зоне системообразующего типа геосистем необходимо понимание механизмов современного техногенеза.

В общем случае любая трансформация компонентов естественного ландшафта, обусловленная прямыми или косвенными воздействиями различного характера в результате хозяйственной деятельности или деятельности промышленных кластеров на различных стадиях их жизненного цикла, называется процессом антропогенноценоза [29]. Сегодня его характеризуют как техногенез. Источниками техногенеза со стороны ЛПК будут являться объекты технической инфраструктуры и хозяйственной деятельности, которые сопряжены с оборотом и переработкой древесного сырья и вызывают изменение характера миграции или аккумуляции химических веществ в различных средах с формированием биогеохимических барьеров на пути их миграции.

Нельзя не отметить эффект «экономической урбанизации» [19] для объектов ЛПК, которые, кроме промышленной переработки древесины и производства бумаги для крупных агломераций мегаполисов, сами являются градообразующими предприятиями со свойственными им проблемами экологического характера. Эта особенность ЛПК накладывает на основные технологические процессы и энергетические системы производства дополнительные нагрузки по подготовке и отведению воды при хозяйственной деятельности. Специфическое экономическое развитие общества потребления, сферы услуг и их общая цифровизация генерируют образование отходов и вторичных материалов в городских агломерациях. Таким образом, ЛПК, как основной переработчик растительного сырья, является поставщиком готовой продукции, а опосредованно и генератором вторичного сырья, которое требует дополнительных решений в управлении этими ресурсами.

В общем случае при техногенезе генетически неизменное поколение «проходит» несколько этапов развития техники, технологии, а главное информационного сопровождения. Для ЛПК частота смены технологии $\beta_{с.т} = 1/T_{с.т}$ (T – общее время всех изменений), которую можно принять за эталонную частоту смены в негенетической информации, сначала была равной смене поколений $\beta_n = 1/T_n$, а затем с переходом и тиражированием наилучшей доступной технологии превысила ее $\beta_{с.т} > \beta_n$. По ряду технологических операций и процессов при создании элементов техносферы в ЛПК частота смены поколений многократно превышает частоту технологического обновления $\beta_n \gg \beta_{с.т}$ – т. н. технический прогресс в объеме производства. Но система воспроизводства растительных ресурсов как основного источника сырья не способна успевать за этими сдвигами

и ростом экономического спроса. Данные процессы имеют важные следствия для организации общества и управления природно-технической системой в части устойчивого инновационного развития в техносфере через различные механизмы техногенеза на самой промышленной площадке и в зоне влияния ЛПК.

Сочетание индустриальной и постиндустриальной составляющих техносферы, неравномерность развития регионов, которые также могут находиться на различных этапах техногенеза, обуславливают реализацию гибкой экологической промышленной политики в управлении ПТК. Большинство лесоперерабатывающих предприятий одновременно проходят конкретные периоды развития и требуют особой организации производственного процесса при переходе от линейной к циркулярной модели экономики.

Влияние ЛПК на механизмы техногенеза. В функционировании лесопромышленного комплекса России можно выделить несколько механизмов техногенеза на различных этапах развития хозяйственной деятельности в лесном секторе.

Наиболее часто обсуждается деградационный механизм [38] в организации и функционировании лесного хозяйства России и водных объектов в зоне влияния деятельности предприятий этой сферы. Если рассматривать данный процесс с экологической точки зрения, то он сопровождается утратой хозяйственного и рекреационного потенциала территории с изменением почвенного слоя, ландшафтов, биоразнообразия и окружающей среды в целом при осуществлении природопользования.

В систему деградационного механизма входит следующее:

изменение исходных характеристик ландшафта и вмещающих пород, которые можно оценить с использованием артериальной оценки потенциальной устойчивости ландшафта [6] под прессингом антропогенной нагрузки;

извлечение древесины разных пород с целью заготовки, а также гибель лесных насаждений вследствие лесных пожаров. Это – основная причина снижения лесистости и увеличения площади фонда лесовосстановления [10, 47];

формирование импровизированных складов древесины, отвалов лесосечных отходов в виде несанкционированного хранения древесных отходов [33]. Следствием становится деградация лесных экосистем с последующим концентрированием и рассеиванием органического вещества;

создание новых композиций, перегруппировка химических элементов, изменение первоначального химического состава с получением ксенобиотиков в виде ламинированной упаковки и изделий из древесины с включением материалов II–III классов опасности;

рассеяние химических элементов, вовлеченных в техногенез, которое может происходить планомерно (внесение удобрений, обработка гербицидами, перемещение грунта при строительных работах и т. д.) и при эмиссии загрязняющих веществ от организованных и неорганизованных источников сбросов и выбросов, в т. ч. из отвалов отходов производства. Концентрации элементов в почвах различных ландшафтов коррелируют с содержанием органического вещества [21], которое при активной лесозаготовке изменяется и регулирует миграционную активность элементов.

Обобщенные классификационные признаки этапов техногенеза на основе анализа природоохранной деятельности предприятий ЛПК и научно-технической литературы приведены в таблице.

Динамика развития техногенеза на различных этапах природопользования
The dynamics of the development of technogenesis at various stages of nature management

Этап техногенеза	Формы хозяйственной деятельности	Доминирующие процессы	Изменение в экосистеме в результате техногенеза	Цель деятельности, приоритетность
Биогенез	–	Естественные	–	Обеспечение проживающих биовидов природными ресурсами в естественной среде. Характер примитивный
Прототехногенез	Элементарные формы хозяйствования. Ограниченная природно-хозяйственная деятельность	Простые технические процессы на фоне естественных ландшафтов. Примитивное изменение ландшафта и ряда естественных геохимических процессов	Истребление отдельных биовидов (растительного и животного происхождения). Изменение продуктивности ландшафтов на отдельных участках биосферы	Расширение ареала овладения новыми биоресурсами. Кочевой характер – собирательство. Обеспечение биопродукцией. Интенсивное освождение площадей и замена биовидов
Индустриальный техногенез (антропогенез)	Механизованное и химическое развитие крупномасштабного промышленного производства ЛПК	Негативное воздействие на постоянной основе, формирование факторов, влияющих на естественные геохимические процессы	Специфическая трансформация окружающей среды на региональном уровне, постепенное развитие проявлений на ландшафтном уровне, необратимые изменения биогеохимических циклов, «кризис редуцентов»	Извлечение максимальной прибыли при интенсификации промышленного производства. Линейная «спекулятивная» экономическая модель деятельности
Современный техногенез (постиндустриальный)	Реализация производства по принципам наилучшей доступной технологии в рамках экологических ограничений	Негативное воздействие в пределах допустимых нагрузок со стабилизацией геохимических процессов	Формирование технополюсов с неконтролируемыми и геохимическими процессами в биосфере в глобальном масштабе, переход биосферы в биотехносферу	Эколого-экономически обоснованное расширение производства с извлечением прибыли и с учетом компенсации ущерба, в т. ч. третьим лицам
Управляемый техногенез (ноотехногенез)	Развитие циркулярной экономики с вовлечением вторичных продуктов в производственные циклы	Минимальное негативное воздействие со стабилизацией геохимических процессов	Искусственно регулируемые в биотехносфере условия, обеспечение качественную среду обитания населения в технополюсах и сохранение биоразнообразия на охраняемых территориях	Достижение эколого-экономического устойчивого развития, основанного на обязательном использовании природоподобных и наилучших технологий

Техногенез нельзя рассматривать исключительно с позиции деградации экосистем. Созидательная роль экологически грамотного управления территории позволяет реализовывать другие механизмы развития управляемых природно-технических систем в зоне влияния ЛПК.

Модифицирующие механизмы техногенеза в части развития территорий ЛПК предполагают искусственное создание условий, благоприятных для развития определенных групп организмов (видов растений) или даже обуславливающих саму возможность их существования. Например, развитие аквакультуры в системе восстановления популяции в зоне водовыпуска сточных вод или адаптации сохраняемых краснокнижных видов в водоохраных зонах. Модифицирующие механизмы можно совмещать с лесовосстановлением. При традиционном проведении таких работ, которые чаще осуществляются на свежих (1–2-летних) вырубках используются экскаваторы (44 %), заменяющие обычно используемые тракторы с плугами (чаще ПЛ-1). На большинстве площадей обработку почвы выполняют бороздами (52 %), но распространена также полосная обработка с микроповышениями и площадками (40 %) [12]. При правильной системе организации работ дополнительно необходимо предусматривать комплексные проекты по обустройству ландшафтного дизайна с оценкой негативного воздействия на всех этапах жизненного цикла этих проектов, что в литературе по отношению к ЛПК сегодня не обсуждается.

Поддерживающий механизм основан на проведении профилактических мероприятий по обслуживанию ландшафта и созданию систем его инженерно-экологического обустройства. Эти работы позволяют сохранять и поддерживать благополучное экологическое состояние конкретного участка окружающей среды без нарушения биогеохимических процессов территории. Пример – искусственная аэрация водных объектов или дноуглубительные работы на русле. Это может быть особенно актуально с возвращением молевого сплава для транспортировки древесины. Сегодня обслуживание площадок для выращивания деловой древесины не предусматривает производственного экологического контроля, хотя этот инструмент должен стать важным регулятором такой системы.

Креативный механизм заключается в создании новых природно-антропогенных объектов, например, развитие значимых историко-культурных, спортивных и оздоровительных объектов. В качестве примера можно привести туристический комплекс Малые Карелы. Наиболее востребованы сегодня туристические тропы (маршруты) на территории создания новых рекреационных зон в режиме восстановления лесов после пожаров или промышленной рубки различного назначения. Важным аспектом в этой части течения техногенеза является использование альтернативных источников энергии при реализации комплексных инфраструктурных объектов.

Управляющий механизм, наиболее перспективный для циркулярной экономики, предполагает включение компонентов иерархической системы организации территории ЛПК (водного объекта, санитарно-защитной зоны, зоны жилой застройки и участков лесного массива) в качестве соподчиненного компонента в управляемую природно-техническую систему. В отличие от «поддерживающего механизма» управление состоянием участка окружающей среды осуществляется не его собственной системой инженерно-экологического обустройства, а регулятором (природопользователем, автоматическим

контролем с включением в региональные, глобальные геоинформационные базы конкретной природно-технической системы, элементом которой является участок). Например, это может быть водный объект, состояние которого отслеживается посредством контроля режимов водовыпуска ряда водопользователей с учетом обеспечения предельно допустимого сброса или режима пропуска вод гидроэлектростанцией с мониторингом условий подтопления определенной территории, входящий в систему лесовосстановления и заготовки древесного сырья.

Процесс техногенеза может включать сочетание различных механизмов реализации на конкретной территории и будет требовать их учета в общей системе управления ПТК на базе ЛПК, которая способна изменяться с развитием искусственного интеллекта.

Сочетание системного поддерживающего и управляющего механизмов техногенеза создает условия формирования природообустроенного техногенеза, который особенно востребован для урбанизированных территорий в современных условиях.

Крупные ПТК, градообразующие предприятия и предприятия 1-й и 2-й категорий воздействия на окружающую среду в обязательном порядке должны разрабатывать планы повышения экологической эффективности, которые сегодня предусмотрены при получении комплексного экологического разрешения для основного производства. Это только часть перехода к устойчивому развитию. Выдача этого документа сопровождается обязательной экологической экспертизой, что является важным регулятором снижения нагрузки на окружающую среду и улучшает ее комфортность для различных биовидов, а также становится элементом управления ПТК.

Экологическая оптимизация инженерно-технических объектов и контроль их эффективности – основа альтернативной стратегии охраны окружающей среды. В современных условиях эта стратегия способна на практике обеспечить реализацию концепции устойчивого развития.

Таким образом, предложенные классификационные признаки техногенеза по этапам его развития на исторических периодах активного природопользования могут способствовать регулированию биогеохимических процессов в зоне влияния ЛПК. Это важно для понимания динамики устойчивого развития регионов, которые могут иметь неодинаковые стартовые позиции, т. к. находятся на различных этапах техногенеза, и на основе обобщенных подходов способны перейти на стадию управляемого техногенеза с меньшими экологическими потерями. Адекватность оценки этапности техногенеза для конкретной территории, на которой выстроен технологический процесс ЛПК, позволит в форсированном режиме отработать и подобрать прогрессивные сочетания механизмов для сбалансированного перехода к устойчивой экономике регионов в зоне их влияния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахмет О.Н., Медведева М.В. Трансформация органического вещества почв на вырубках различного возраста среднетаежной подзоны Карелии // Лесоведение. 2013. № 3. С. 38–45.

Bakhmet O.N., Medvedeva M.V. Transformation of Soil Organic Matter in Cuttings of Various Ages in the Middle Taiga Subzone of Karelia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2013, no. 3, pp. 38–45. (In Russ.).

2. Безопасность деятельности. Энциклопедический словарь / под ред. О. Н. Русака. СПб.: Лик, 2003. 502 с.

Activity Safety. *Encyclopedic dictionary*. Ed. by O.N. Rusak. St. Petersburg, Lik Publ., 2003. 502 p. (In Russ.).

3. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Возобновление и рост хвойных на вырубках южно-таежных лесов Среднего Приангарья // География и природ. ресурсы. 1997. № 3. С. 124–133.

Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S. Renewal and Growth of Conifers in Clearings of Southern Taiga Forests of the Middle Angara Region. *Geografiya i prirodnye resursy* = Geography and Natural Resources, 1997, no. 3, pp. 124–133. (In Russ.).

4. Виноградов А.Ю., Ржавцев А.А., Бачериков И.В., Хвалев С.В., Обязов В.А., Сазонова С.И., Кадацкая М.М., Парфенов Е.А., Виноградов И.А. О применимости молевого сплава по малым рекам в современных условиях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 231. С.110–130.

Vinogradov A.Y., Rzhavtsev A.A., Bacherikov I.V., Hvalev S.V., Obyazov V.A., Sazonova S.I., Kadatskaya M.M., Parfenov E.A., Vinogradov I.A. On the Applicability of Loose Logs Driving on Small Rivers in Modern Conditions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, iss. 231, pp. 110–130. (In Russ.).

5. Гераськина А.П., Тебенькова Д.Н., Ершов Д.В., Ручинская Е.В., Сибирицева Н.В., Лукина Н.В. Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем // Вопр. лесн. науки. 2021. Вып.: Лесные пожары. Т. 4. № 2. Ст. № 82. Режим доступа: https://jfsi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Wildfires_as_a_factor-2021.pdf (дата обращения: 17.01.25).

Geraskina A.P., Tebenkova D.N., Ershov D.V., Ruchinskaya E.V., Sibirtseva N.V., Lukina N.V. Wildfires as a Factor of the Loss of Biodiversity and Functions of Forest Ecosystems. *Voprosy lesnoj nauki* = Forest Science Issues, 2021, Iss.: Wildfires, vol. 4, no. 2, art. no. 82. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202142-11>

6. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н., Морозова А.С., Пилюгина А.А., Свердлова О.А., Сиротина П.М., Федорова М.Е., Черепанов С.В., Шакуров В.А. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов: модели, результаты, перспективы // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исследований. 2017. № 9. С. 110–114.

Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N., Morozova A.S., Pilyugina A.A., Sverdlova O.A., Sirotina P.M., Fedorova M.E., Cherepanov S.V., Shakurov V.A. Integral Assessment of Landscape Sustainability: Models, Results, Prospects. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij* = International Journal of Applied and Basic Researches, 2017, no. 9, pp. 110–114. (In Russ.).

7. Дмитриева В.А., Нefeldова Е.Г. Гидроэкологическая роль лесных насаждений в формировании режима водных ресурсов // Лесотехн. журн. 2015. № 3. С. 22–33.

Dmitrieva V.A., Nefedova E.G. Hydroecological Role of Forest in Formation of Regime of Water Resources. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2015, no. 3, pp. 22–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/14150>

8. Долгая В.А., Бахмет О.Н. Свойства лесных подстилок на ранних этапах естественного лесовозобновления после сплошных рубок в средней тайге Карелии // Лесоведение. 2021. № 1. С. 65–77.

Dolgaya V.A., Bakhmet O.N. Forest Litter Layer Properties on the Early Stages of Natural Regrowth after Clear Cuts in Karelian Middle Taiga. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2021, no. 1, pp. 65–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821010022>

9. Дягилева А.Б. Устойчивость и агрегация низкоконцентрированных водных дисперсий технических лигнинов, выделенных при переработке древесного сырья: дис. ... д-ра хим. наук. Санкт-Петербург, 2010. 378 с.

Dyagileva A.B. *Stability and Aggregation of Low-Concentration Aqueous Dispersions of Technical Lignins Isolated during Processing of Wood Raw Materials*: Doc. Chem. Sci. Diss. St. Petersburg, 2010. 378 p. (In Russ.).

10. Ермоленко А.А. Анализ состояния и причин изменения лесистости в Центральном федеральном округе: сложившаяся практика и возможные решения // Лесохоз. информ. 2018. № 4. С. 55–65.

Ermolenko A.A. Analysis of the State and Causes of Changes in Forest Cover in the Central Federal District: Current Practice and Possible Solutions. *Lesokhozyajstvennaya Informatsiya* = Forestry Information, 2018, no. 4, pp. 55–65. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.4.06>

11. Занозин В.В., Бармин А.Н., Валов М.В. Исследование степени антропогенной преобразованности природных территориальных комплексов // Геология, география и глобальная энергия. 2019. № 4(75). С. 168–179.

Zanozin V.V., Barmin A.N., Valov M.V. Studies of the Degree of Anthropogenic Transformation of Natural Territorial Complexes. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* = Geology, Geography and Global Energy, 2019, no. 4(75), pp. 168–179. (In Russ.).

12. Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П. Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 52–64.

Ilintsev A.S., Romanov E.M., Voronin V.V., Bogdanov A.P. Modern Practice of Artificial Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 52–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-52-64>

13. Исаев А.С., Абаимов А.П., Бузыкин А.И., Ефремов С.П., Назимова Д.И., Петренко Е.С., Семечкин И.В. Лесная биогеоценология – составная часть лесоведения // Лесоведение. 2005. № 4. С. 4–11.

Isaev A.S., Abaimov A.P., Buzykin A.I., Efremov S.P., Nazimova D.I., Petrenko E.S., Semechkin I.V. Forest Biogeocenology is a Component of Forest Science. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2005, no. 4, pp. 4–11. (In Russ.).

14. Ишутин Я.Н., Ключников М.В., Бушков Н.Т., Ильичев Ю.Н., Тараканов В.В., Маскаев В.Н. Применение генетически улучшенного посадочного материала при облесении вырубок в горельниках Приобских боров // Хвойные бореал. зоны. 2007. Т. 24, № 2-3. С. 187–192.

Ishutin Ya.N., Klyuchnikov M.V., Bushkov N.T., Il'ichev Yu.N., Tarakanov V.V., Maskaev V.N. The Use of Genetically Improved Planting Material for Afforestation of Clearings in Burnt Areas of Priobsky Pine Forests. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2007, vol. 24, no. 2-3, pp. 187–192. (In Russ.).

15. Казеев К.Ш., Солдатов В.П., Шхатацев А.К., Шевченко Н.Е., Грабенко Е.А., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение свойств дерново-карбонатных почв после сплошной рубки в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного // Лесоведение. 2021. № 4. С. 426–436.

Kazeev K.Sh., Soldatov V.P., Shkhatatsev A.K., Shevchenko N.Ye., Grabenko Ye.A., Ermolaeva O.Yu., Kolesnikov S.I. Changes in the Properties of Calcareous Soils after Clearcutting in the Coniferous-Deciduous Forests of the Northwestern Caucasus. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2021, no. 4, pp. 426–436. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821040069>

16. Кальнер В.Д. «Зомби экономика» и биоразнообразие планеты // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 1. С. 60–64.

Kalner V.D. «Zombie Economics» and Biodiversity of the Planet. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 60–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-1-60-64>

17. Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Оценка изменения элементов водного баланса в первый год после рубок в таежной зоне Европейского Севера России // Уч. зап. рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2014. № 33. С. 31–44.

Karpechko Yu.V., Myasnikova N.A. Estimation of Water Balance Terms Changes during the First Year after Logging in the Taiga Zone of the Northern European Russia. *Uchenye zapiski Rossijskogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 2014, no. 33, pp. 31–44. (In Russ.).

18. Коган Р.М., Панина О.Ю. Исследование влияния пожаров на фитотоксичность почв (на примере широколиственных лесов еврейской автономной области) // Вестн. Приамур. гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2010. № 2(6). С. 40–41.

Kogan R.M., Panina O.Y. Investigation of Influence of Fires Phyto-Toxicity on Soil (on Example Broad Leaf-Bearing Forest Jewish Autonomous Region). *Vestnik Priamurskogo universiteta im. Sholom-Alejkhema* = Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem, 2010, no. 2(6), pp. 40–41. (In Russ.).

19. Косарева Н.Б., Полиди Т.Д., Пузанов А.С. Экономическая урбанизация. М.: Институт экономики города, 2018. 418 с.

Kosareva N.B., Polidi T.D., Puzanov A.S. Economic Urbanization. Moscow, *Institut ekonomiki goroda* = The Institute for Urban Economics, 2018. 418 p. (In Russ.).

20. Макаренко Е.Л. Оценка образования отходов лесозаготовки и деревообработки в центральной зоне Байкальской природной территории // Успехи соврем. естествознания. 2020. № 5. С. 63–69.

Makarenko E.L. Assessment of Forestry and Woodworking Waste Formation in Central Ecological Area of the Baikal Natural Territories. *Uspekhi sovremennogo estesvoznaniya* = Advances in Current Natural Science, 2020, no. 5, pp. 63–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37393>

21. Махинова А.Ф., Махинов А.Н., Купцова В.А., Лю Шугуан, Ермошин В.В. Ландшафтно-географическое районирование бассейна р. Амур (Российская часть) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33, № 2. С. 76–89.

Makhinova A.F., Makhinov A.N., Kuptsova V.A., Liu S., Ermoshin V.V. Landscape-Geographical Zoning of the Amur Basin (Russian Territory). *Tikhookeanskaya ekologiya* = Russian Journal of Pacific Geology, 2014, vol. 8, pp.138–150. <https://doi.org/10.1134/S1819714014020043>

22. Мишина И. Лесные пожары 2023: масштаб бедствия приближается к национальной катастрофе. Режим доступа: <https://newizv.ru/news/2023-05-11/lesnye-pozhary-2023-masshtab-bedstviya-priblizhaetsya-k-natsionalnoy-katastrofe-406879> (дата обращения: 27.02.24).

Mishina I. *Forest Fires 2023: the Scale of the Disaster is Approaching a National Catastrophe*. (In Russ.).

23. Онучин А.А., Буренина Т.А., Зирюкина Н.В., Фарбер С.К. Лесогидрологические последствия рубок в условиях средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 110–118.

Onuchin A.A., Burenina T.A., Ziryukina N.V., Farber S.K. Impact of Forest Harvesting and Forest Regeneration on Runoff Dynamics at Watersheds of Central Siberia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, no. 1, pp. 110–118. (In Russ.).

24. Организация Объединенных Наций: Восемьдесят первая сессия Сан-Марино, 20–23 ноября 2023 года. Вопросы, касающиеся Европейской комиссии по лесному хозяйству (Продовольственной и сельскохозяйственной организации GE.23-16420 (R) 040923 290923).

United Nations Organization: Eighty First Session San Marino, November 20–23, 2023. Issues Concerning the European Forestry Commission (Food and Agriculture Organization of the United Nations GE.23-16420 (R) 040923 290923). (In Russ.).

25. Очистка и рекуперация промышленных выбросов / под общ. ред. В.Ф. Максимова, И.В. Вольфа. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 416 с.

Cleaning and Recovery of Industrial Emissions. Under the gen. ed. by V.F. Maksimov, I.V. Wolf. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 416 p. (In Russ.).

26. Патент 2734634 С1 РФ, МПК C05F11/00 A01N65/06. Способ получения стимуляторов роста из водной вытяжки коросодержащей массы: № 2019118614: заявл. 17.06.2019; опубл. 21.10.2020 / А.Б. Дягилева, А.И. Смирнова, С.Б. Михайлова, Д.В. Дягилева.

Dyagileva A.B., Smirnova A.I., Mikhailova S.B., Dyagileva D.V. *Method for Obtaining Growth Stimulants from an Aqueous Extract of Bark-Containing Mass.* Patent RF no. RU 2734634 C1, 2020. (In Russ.).

27. *Побединский А.В.* Водоохранная и почвозащитная роль лесов. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 174 с.

Pobedinsky A.V. *The Water and Soil Protection Role of Forests.* Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 174 p. (In Russ.).

28. *Пристова Т.А., Василевич М.И.* Химический состав снежного покрова в лесных экосистемах в зоне аэротехногенного влияния целлюлозно-бумажного производства // Изв. СамНЦ РАН. 2010. Т. 12, № 1(9). С. 2313–2316.

Pristova T.A., Vasilevich M.I. Chemical Composition of Solid Precipitates in Forest Ecosystems of Background Areas and in the Zone of Aerotechnogenic Impact of Pulp and Paper Mill. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1(9), pp. 2313–2316. (In Russ.).

29. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование: Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с. Rejmers N.F. *Nature Management: Reference Dictionary.* Moscow, Mysl' Publ., 1990. 637 p. (In Russ.).

30. *Семенякин Д.А., Тихонова И.В.* Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 33–51.

Semenyakin D.A., Tikhonova I.V. The Use of Multivariate Data Analysis in Assessing the State of Advance and After-Regeneration of Pine Forests after Selective Felling. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 33–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-33-51>

31. *Сиваков В.П., Мехренцев А.В., Вураско А.В.* История и современное состояние целлюлозно-бумажной промышленности России // Леса России и хозяйства в них. 2019. № 1(68). С. 75–83.

Sivakov V.P., Mekhrentsev A.V., Vurasko A.V. History and Current State of the Pulp and Paper Industry. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh = Forests of Russia and Economy in them*, 2019, no. 1(68), pp. 75–83. (In Russ.).

32. *Сюнёв В.С., Графова Е.О.* Новые технические решения по снижению негативного воздействия лесопромышленных производств на лесную среду // Resources and Technology. 2022. № 19(1). С. 48–71.

Syunev V.S., Grafova E.O. New Technical Solutions for Reducing the Negative Impact of Forest Industries on the Forest Environment. *Resources and Technology*, 2022, no. 19(1), pp. 48–71. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6103>

33. *Троицкая Р.М.* О развитии отечественных целлюлозно-бумажных предприятий, осуществляющих варку целлюлозы из древесины // Трубопроводная арматура и оборудование. 2022. № 1(118). С. 54–57.

Troitskaya R.M. On the Development of Domestic Pulp and Paper Enterprises that Produce Pulp from Wood. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*, 2022, no. 1(118), pp. 54–57. (In Russ.).

34. Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Ассоциации полициклических ароматических углеводородов в пройденных пожарами почвах // Вестн. моск. ун-та. Сер. 5.: География. 2011. № 3. С. 13–19.

Tsibart A.S., Gennadiev A.N. Associations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fire-Affected Soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* = Moscow University Bulletin. Series 5: Geography, 2011, no. 3, pp. 13–19. (In Russ.).

35. Шестеркин В.П. Влияние торфяных пожаров на химический состав снежного покрова и поверхностных вод // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 49–54.

Shesterkin V.P. The Influence of Peat Fires on the Chemical Composition of Snow Cover and Surface Waters. *Geografiya i prirodnye resursy* = Geography and Natural Resources, 2009, no. 1, pp. 49–54. (In Russ.).

36. Шестеркина Н.М., Шестеркин В.П., Таловская В.С., Ри Т.Д. Пространственно-временная изменчивость содержания растворенных элементов в водах реки Амур // Водн. ресурсы. 2020. Т. 47, № 3. С. 336–347.

Shesterkina N.M., Shesterkin V.P., Talovskaya V.S., Ri T.D. Space and Time Variations of the Concentrations of Dissolved Forms of Microelements in Amur River Water. *Vodnye resursy* = Water Resources, 2020, vol. 47, no. 3, pp. 336–347. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0321059620020170>

37. Шилин М.Б., Леднова Ю.А., Меньшакова М.Ю., Гайнанова Р.И., Румянцева Е.А. Птицы в техносфере // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2023. Вып. 246. С. 67–89.

Shilin M.B., Lednova J.A., Menshakova M.J., Gaynanova R.I., Rumiantceva E.A. Birds in the Technosphaera. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 246, pp. 67–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.67-89>

38. Шутов И.В. Деградация лесного хозяйства России. СПб.: СПбНИИЛХ, 2006. 97 с.

Shutov I.V. *Degradation of Forestry in Russia*. St. Petersburg, Saint-Petersburg Forestry Research Institute Publ., 2006. 97 p. (In Russ.).

39. Шутов И.В. Остановить деградацию лесов России! 2-е изд., расшир. и доп. М.: Лесн. страна, 2007. 227 с.

Shutov I.V. *Stop the Degradation of Forests in Russia!* 2nd ed., enlarged. Moscow, Lesnaya strana Publ., 2007. 227 p. (In Russ.).

40. Adams M.A. Mega-Fires, Tipping Points and Ecosystem Services: Managing Forests and Woodlands in an Uncertain Future. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 294, pp. 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.039>

41. Ahlgren I.F., Ahlgren C.E. Effects of Prescribed Burning on Soil Microorganisms in a Minnesota Jack Pine Forest. *Ecology*, 1965, vol. 46, iss. 3, pp. 304–310. <https://doi.org/10.2307/1936333>

42. Amiro B.D., Todd J.B., Wotton B.M., Logan K.A., Flannigan M.D., Stocks B.J., Mason J.A., Martell D.L., Hirsch K.G. Direct Carbon Emissions from Canadian Forest Fires, 1959–1999. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 31, no. 3, pp. 512–525. <https://doi.org/10.1139/x00-197>

43. Ansink E., Hein L., Hasund K.P. To Value Functions or Services? An Analysis of Ecosystem Valuation Approaches. *Environmental Values*, 2008, vol. 17, iss. 4, pp. 489–503. <https://doi.org/10.3197/096327108X368502>

44. Benyon R., Culvenor D., Simms N., Opie K., Siggins A., Doody T. Evaluation of Remote Sensing for Predicting Long Term Hydrological Impacts of Forest Regeneration as a Result of Bushfire. *Technical Report, Ensis*, 2007, no. 163. 55 p.

45. Bond-Lamberty B., Peckham S.D., Ahl D.E., Gower S.T. Fire as the Dominant Driver of Central Canadian Boreal Forest Carbon Balance. *Nature*, 2007, vol. 450, pp. 89–92. <https://doi.org/10.1038/nature06272>
46. Bowd E.J., Banks S.C., Strong C.L., Lindenmayer D.B. Long-Term Impacts of Wildfire and Logging on Forest Soils. *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, pp. 113–118. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0294-2>
47. Chaillan F., Chaîneau C.H., Point V., Saliot A., Outdot J. Factors Inhibiting Bioremediation of Soil Contaminated with Weathered Oils and Drill Cuttings. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 144, iss. 1, pp. 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.016>
48. Crutzen P., Heidt L.E., Krasnec J.P., Pollock W.H., Seiler W. Biomass Burning as a Source of Atmospheric Gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl and COS. *Nature*, 1979, vol. 282, pp. 253–256. <https://doi.org/10.1038/282253a0>
49. Fan W., Yang Y.S., Du X.Q., Lu Y., Yang M.X. Finger-Printing Biodegradation of Petroleum Contamination in Shallow Groundwater and Soil System using Hydro-Bio-Geochemical Markers and Modeling Support. *Water, Air & Soil Pollution*, 2011, vol. 220, pp. 253–263. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0751-7>
50. FAO. 2022. *The State of the World's Forests 2022. Forest Pathways for Green Recovery and Building Inclusive, Resilient and Sustainable Economies*. Rome, FAO, 2022. 166 p. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
51. Kashian D.M., Romme W.H., Tinker D.B., Turner M.G., Ryan M.G. Postfire Changes in Forest Carbon Storage over a 300-year Chronosequence of *Pinus contorta*-Dominated Forests. *Ecological Monographs*, 2013, vol. 83, iss. 1, pp. 49–66. <https://doi.org/10.1890/11-1454.1>
52. Kawahigashi M., Prokushkin A., Sumida H. Effect of Fire on Solute Release from Organic Horizons under Larch Forest in Central Siberian Permafrost Terrain. *Geoderma*, 2011, vol. 166, iss. 1, pp. 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.027>
53. Kuczera G. Prediction of Water Yield Reductions Following a Bushfire in Ash-Mixed Species Eucalypt Forest. *Journal of Hydrology*, 1987, vol. 94, iss. 3-4, pp. 215–236. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90054-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90054-0)
54. Kulikowska D. Kinetics of Organic Matter Removal and Humification Progress during Sewage Sludge Composting. *Waste Management*, 2016, vol. 49, pp. 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.005>
55. Smith H.G., Sheridan G.J., Lane P.N.J., Nyman P., Haydon S. Wildfire Effects on Water Quality in Forest Catchments: A Review with Implications for Water Supply. *Journal of Hydrology*, 2011, vol. 396, iss. 1-2, pp. 170–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.043>
56. Walker X.J., Baltzer J.L., Cumming S.G., Day N.J., Ebert C., Goetz S., Johnstone J.F., Potter S., Rogers B.M., Shuur E.A.G., Turetsky M.R., Mack M.C. Increasing Wildfires Threaten Historic Carbon Sink of Boreal Forest Soils. *Nature*, 2019, vol. 572, no. 7770, pp. 520–523. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1474-y>
57. Yang Y., Hu X., Wang Y., Jin T., Cao X., Han M. Preliminary Study on Methods to Calculate Dynamic Reserves of Slope Eroding Materials Transported by Post-Fire Debris Flow. *Journal of Engineering Geology*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 151–161. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-008>
58. Zanolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V. Recent Decrease in Carbon Sink to Russian Forests. *Doklady Biological Sciences*, 2017, vol. 476, pp. 200–202. <https://doi.org/10.1134/S0012496617050064>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 678.031:54-112
DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-197-209

Свойства коры березы, влияющие на сепарацию бересты от луба

Р.Г. Сафин, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID*: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

К.В. Валеев[✉], *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID*: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Л.Р. Фахрутдинова, *инж.*; *ResearcherID*: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0009-0003-9918-0397),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9918-0397>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru[✉],
lnazipova@internet.ru

Поступила в редакцию 14.03.24 / Одобрена после рецензирования 07.06.24 / Принята к печати 09.06.24

Аннотация. Рассматривается проблема использования березовой коры в Российской Федерации, где значительные запасы этого сырья применяются в основном в качестве твердого топлива. Представлены методы исследования измельчения и сепарации березовой коры, а также извлечения биологически активного вещества – бетулина – из бересты. Литературный обзор выявил: важность сепарации коры на луб и бересту; зависимость сепарируемости луба и бересты от влажности коры березы, степени измельчения и др.; необходимость изучения свойств коры березы. Получены зависимости: плотности бересты и луба от влажности; кинетические кривые водопоглощения при различных температурах; выхода бересты от степени измельчения. Установлено, что при влажности измельченной коры более 35 % происходит гравитационная сепарация бересты от луба в водной среде. Данные зависимости позволят оптимизировать процесс увлажнения коры. На основе изучения свойств коры, бересты и луба рекомендовано проведение сепарации в 2 стадии: механическое и гидростатическое разделение. Анализ результатов исследования свойств коры березы, влияющих на сепарацию бересты от луба, показал целесообразность измельчения коры в молотковой дробилке со скоростью вращения ротора 1500 об./мин с влажностью материала 42–52 % в течение 45–90 с при дальнейшей классификации измельченных частиц на 3 фракции: крупную с размерами частиц более 2 мм с преимущественным содержанием бересты; мелкую с частицами менее 1 мм с превалированием в составе луба; среднюю с размерами частиц 1–2 мм с более 30 % бересты. Бересту из средней фракции следует выделить гравитационным осаждением в воде в течении 3–10 мин. Выявленные оптимальные режимные параметры процесса сепарации бересты от луба дают возможность получить конечные продукты, в частности бетулин, более высокого качества.

Ключевые слова: кора, сепарация, береста, луб, измельчение, влажность

Для цитирования: Сафин Р.Г., Валеев К.В., Фахрутдинова Л.Р. Свойства коры березы, влияющие на сепарацию бересты от луба // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 197–209. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-197-209>

Original article

The Properties of Birch Bark Affecting the Separation of Birch Bark from Bast

Rushan G. Safin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

Kirill V. Valeev[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Leysan R. Fakhrutdinova, Engineer; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0009-0003-9918-0397),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9918-0397>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru[✉], lnazipova@internet.ru

Received on March 14, 2024 / Approved after reviewing on June 7, 2024 / Accepted on June 9, 2024

Abstract. The article considers the problem of using birch bark in the Russian Federation, where significant reserves of this raw material are used mainly as solid fuel. The methods of studying the grinding and separation of birch bark, as well as the extraction of biologically active substance – betulin – from birch bark are presented. The literature review has revealed: the importance of separating the bark into bast and birch bark; the dependence of the separability of bast and birch bark on the moisture content of birch bark, the degree of grinding, etc.; the need to study the properties of birch bark. The dependencies of the density of birch bark and bast on moisture content, of the yield of birch bark on the degree of grinding, as well as the kinetic curves of water absorption at different temperatures have been obtained. It has been established that when the moisture content of the grinded bark is more than 35 %, the gravitational separation of birch bark from bast occurs in an aquatic medium. These dependencies will make it possible to optimize the bark moistening process. Based on the study of the properties of bark, birch bark and bast, it is recommended to carry out separation in 2 stages: mechanical and hydrostatic separation. An analysis of the results of the study of the properties of birch bark affecting the separation of birch bark from bast has shown the feasibility of grinding the bark in a hammer grinder with a rotor speed of 1500 rpm with a material moisture content of 42–52 % for 45–90 s with further classification of the grinded particles into 3 fractions: large with particle sizes of more than 2 mm with a predominant content of birch bark; fine with particles of less than 1 mm with a predominance of bast in the composition; medium with particle sizes of 1–2 mm with more than 30 % birch bark. Birch bark from the medium fraction should be separated by gravitational sedimentation in water for 3–10 min. The identified optimal operating parameters for separating birch bark from bast make it possible to obtain final products, in particular betulin, of higher quality.

Keywords: bark, separation, birch bark, bast, grinding, humidity

For citation: Safin R.G., Valeev K.V., Fakhrutdinova L.R. The Properties of Birch Bark Affecting the Separation of Birch Bark from Bast. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 197–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-197-209>



Введение

В Российской Федерации на 2023 г. запасы стволовой древесины березы (не включая сухостой) составляли свыше 172 м³/га, а это 20 млрд м³, из них некондиционная древесина – это 20 %, она не перерабатывается, а используется только в качестве твердого топлива [3, 4]. Что касается деревообрабатывающих предприятий, например, на фанерно-мебельных, домостроительных комбинатах и других ведущих производствах страны ежедневно остается до 4,3 т невостробанной коры березы [14].

Содержание березовой коры составляет 10–12,5 % от массы дерева, на долю бересты приходится 16–20 % ее массы. Важной задачей для целлюлозно-бумажной, фанерной и деревообрабатывающей промышленности является создание безотходных технологий переработки древесины. Вопрос использования такого громадного количества березовой коры превращается в актуальную и серьезную проблему. Кору сжигают или вывозят в отвалы, в то время как береста – сильнейший природный антисептик и биостимулятор. Береста и луб березы обладают различными свойствами и поэтому имеют разное применение [2, 6].

Береста содержит до 50 % экстрактивных веществ, наиболее важным из которых является бетулин, обладающий немалым потенциалом как сырье для химической отрасли с целью получения новых продуктов и биологически активных добавок [1, 7–10, 12, 13, 15]. Для извлечения бетулина высокой степени чистоты требуется предварительная сепарация коры от луба.

Луб – основная часть березовой коры (около 80 %) – имеет в составе водорастворимые вещества, наиболее ценными из которых являются таннины – полифенольные соединения, обладающие дубящими свойствами, а также содержащие антоцианидиновые красители [5, 16].

В настоящее время ведется разработка методов сепарации коры березы на луб и бересту.

Способ переработки березовой коры представлен в патенте Г.В. Сироткина и др. [11]. Данный способ включает в себя измельчение коры в 2 стадии: на 1-й применяется корорубка или ножевая дробилка, на 2-й используется молотковая дробилка. Процесс проводится при влажности 55 %. После измельчения сепарация коры на луб и бересту также осуществляется в 2 стадии: разделение частиц на вибросите или любом другом известном устройстве, потом применяется пневматический классификатор. За измельчением и сепарированием следует экстракция бетулина из бересты березы.

И.Г. Поварнинным был предложен способ отделения бересты от березовой коры [8], при котором кору обрабатывают кипячением в воде около 2 ч до полного размягчения луба и древесины. После того, как луб и древесина размягчились, их соскабливают, или обкатывают, в барабане. Бересту подсушивают до влагосодержания 3–6 %.

Известен способ получения бересты [10], предложенный В.В. Балакшиным и А.Н. Чистяковым: сырую кору березы, оставшуюся после лущения на фанерных производствах, перебирают. Набухшую кору отправляют на измельчение в молотковую дробилку. В процессе измельчения происходит расслоение луба и пробковой ткани. После этого сырье просеивают через сито. Сепарация дает 2 фракции: частицы, не прошедшие сквозь отверстия – береста или берестяная стружка; частицы, прошедшие через отверстия – луб и мелкие частицы бересты. Сепарированную бересту отправляют на дальнейшую переработку.

Способ переработки березовой коры на бересту и луб, запатентованный В.Е. Воскресенским и др. [9], включает окорку чурака со снятием коры и одновременное измельчение с получением смеси бересты и луба необходимой фракции, а затем фрезерование фракции с целью отделения бересты от луба.

Способ комплексной переработки березовой коры, разработанный Б.Н. Кузнецовым и др. [12], предполагает измельчение коры любым известным способом, ее сепарацию на бересту и луб, экстракцию из них биологически активных веществ. При этом выход бетулина составляет 22,5 %, суберина – 31 % от общей массы бересты, порошка полифенолов – 10 % от общей массы луба.

Р.А. Krasutsky описал способ переработки коры [19]. Поднята проблема использования древесных отходов, а именно древесины березы. Отходы деревообрабатывающих предприятий Канады, США, Финляндии и Китая насчитывают по 40 т сырой коры ежедневно, что составляет 12 % от общей массы березы. 27,5 % коры березы применяется в качестве дешевого топлива. Важнейшая часть переработки коры березы заключается в отделении бересты от луба. Специально разработанные способы измельчения и просеивания коры позволяют получать наружную бересту хорошего качества, но с большими потерями в бересте. Также низкая насыпная плотность наружной бересты (~0,1 г/мл) делает это сырье дорогостоящим при транспортировке и неэффективным при извлечении. В городе Ту-Харборс, штат Миннесота, США, запущено первое в мире предприятие по производству гранул из бересты. Это можно считать началом промышленного периода переработки бересты.

В работе R.M. Carlson et al. [20] представлены 2 способа сепарации бересты от луба березы. Первый способ заключается в разделении путем просеивания смеси через сетку с отверстиями промежуточного размера между меньшими кусочками бересты и более крупными внешними кусочками коры. Более мелкие частицы коры проходят через сито и отделяются от бересты. Второй способ состоит в сепарации коры от бересты с помощью воздушного классификатора. Воздушный классификатор представляет собой устройство, которое работает по принципу различных свойств 2 компонентов (например коры и бересты) в потоке воздуха для осуществления физического разделения. Как правило, менее плотная часть коры – луб – переносится воздушным потоком на большее расстояние, чем более плотная часть – береста. В результате внутренняя и внешняя части коры могут быть разделены. После отделения бересты от луба обычно получают внешнюю березовую кору в количестве от 10 до 45 мас. % в зависимости от исходного содержания бересты.

Все разработанные способы и аппаратные оформления не имеют теоретической базы. Однако выявлено, что сепарируемость бересты от луба обуславливается влажностью коры, способами влагонасыщения, степенью измельчения и т. д., поэтому актуально систематизировать исследование этих параметров.

Влажность коры в свежесрубленной березе в зависимости от места произрастания варьирует в диапазоне 30–70 % и может превышать 100 %, влажность бересты при этом составляет 7–27 %. При транспортировке и складировании березы происходит ее естественная сушка. При этом влажность древесины снижается до 22–40 % в соответствии с временем года. Критической для фрик-

ционной окорки является влажность 42 %. Если значение ниже, то сырье не окоряется до тех пор, пока не увлажнится [17, 18]. Для достижения требуемой влажности коры (более 42 %) ее насыщают водой.

Степень измельчения для конкретного вида сырья зависит от конструкции измельчителя, скорости движения измельчающего элемента, размеров сита, установленных на выходе из измельчителя.

Целью данной работы является исследование свойств коры березы: плотности, влаго- и водопоглощения, степени измельчения, – влияющих на сепарируемость бересты от луба, и предложение рациональных режимных параметров сепарации бересты от коры.

В задачи исследования входило представление:

- кинетических зависимостей влаго- и водопоглощения коры, бересты, луба от температуры;
- кривых распределения измельченных частиц в зависимости от их влажности и продолжительности измельчения;
- зависимости плотности бересты и луба от влагосодержания;
- кинетических зависимостей скорости гравитационного осаждения бересты, луба от размеров частиц;
- рекомендаций по сепарации бересты от луба.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья для исследования физических свойств использовались свежая и сухая кора березы, полученные с лущильного станка. Кинетику влаго- и водонасыщения коры определяли при температурах 25, 55, 90 и 100 °С.

Влажность коры березы, а также отдельно луба и бересты фиксировали путем замера массы образцов после погружения в воду или насыщения паром. Температура воды поддерживалась термостатом. Насыщение паром проводили при атмосферном давлении при 100 °С.

Получены экспериментальные кинетические зависимости водо- и водопоглощения коры березы при различных температурах. Влажность коры при пропитке вычисляли как отношение разности масс пропитанной ($m_{вл}$) и абсолютно сухой (m_c) коры к массе влажной коры ($m_{вл}$):

$$U = \frac{m_{вл} - m_c}{m_{вл}} 100 \%. \quad (1)$$

Для осуществления измельчения образцов применяли молотковую дробилку марки МД 2×2 со скоростью вращения ротора 1500 об./мин и выходным отверстием 5 мм. Продолжительность процесса определялась по максимальному значению выхода требуемой фракции. Начальная влажность образцов коры составляла 25, 35, 45 и 55 %. Сырье измельчалось до размеров 0,1–30,0 мм в течение 1, 2, 3 мин, затем проводился ситовый анализ на виброситовой установке Analysette 3 Pro. После сепарации каждая фракция с сита взвешивалась, и рассчитывалась ее доля – отношение массы фракции (m_i) к общей массе ($\sum m$). По данным ситового анализа строились гистограммы распределения частиц по размерам при различных начальной влажности и продолжительности измельчения.

Плотность луба и бересты в зависимости от влажности материала определяли путем вымачивания образцов в воде при комнатной температуре. Плотность (ρ_U) каждого образца при влажности (U) в момент испытания вычислялась по соотношению:

$$\rho_U = \frac{m_{\text{вл}}}{V_U} = \frac{m_{\text{вл}}}{V_c (1 + \beta U)}, \quad (2)$$

где V_U – объем образца при влажности U ; V_c – объем абсолютно сухого образца; β – коэффициент разбухания, для луба – 0,77 [1]; для бересты – 0,28 [21].

Массу влажного материала можно выразить через массу сухого:

$$m_{\text{вл}} = \frac{m_c}{1 - U}. \quad (3)$$

Совместным решением (2) и (3) получаем аналитическое описание зависимости плотности луба и бересты от влажности через плотности абсолютно сухих образцов ρ_c :

$$\rho_U = \frac{\rho_c}{(1 + \beta U)(1 - U)}. \quad (4)$$

Кинетика гравитационного осаждения луба определяется визуально с помощью мензурок. В мензурку заливается вода, в нее погружается измельченная кора (смесь луба и бересты). В течение 10 мин наблюдают за осаждением частиц. Интенсивность осаждения луба (W) рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{\Delta V}{\Delta \tau}, \quad (5)$$

где ΔV – изменение объема осажденных частиц луба за время $\Delta \tau$.

Экспериментальные значения, приведенные в работе, получены усреднением 3 повторных измерений.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений кинетики водо- и влагопоглощения (1) при различных температурах представлены на рис. 1.

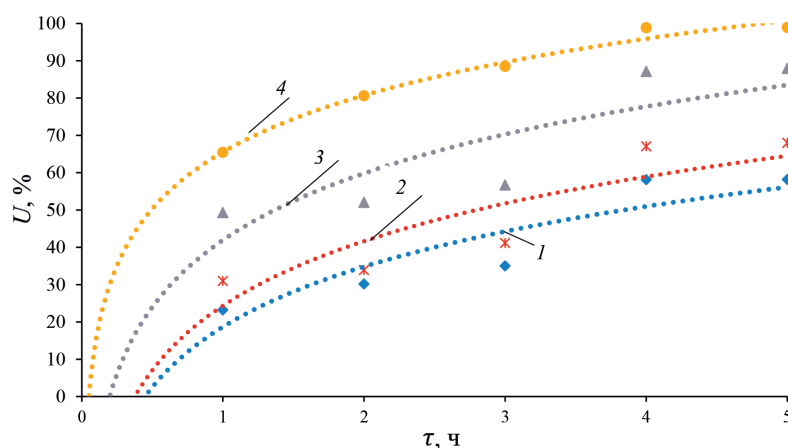


Рис. 1. Кинетика поглощения воды/влаги корой березы при различных температурах, °C: 1 – 25; 2 – 55; 3 – 90; 4 – 100

Fig. 1. The kinetics of water/moisture absorption by birch bark at different temperatures, °C: 1 – 25; 2 – 55; 3 – 90; 4 – 100

Анализ кривых рис. 1 показывает, что водопоглощение до влажности 55 % в воде без подогрева составляет 5 ч. Для ускорения процесса увлажнения сухой коры целесообразно вести его в среде влажного насыщенного пара при атмосферном давлении.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения частиц, измельченных в молотковой дробилке при различной начальной влажности коры.

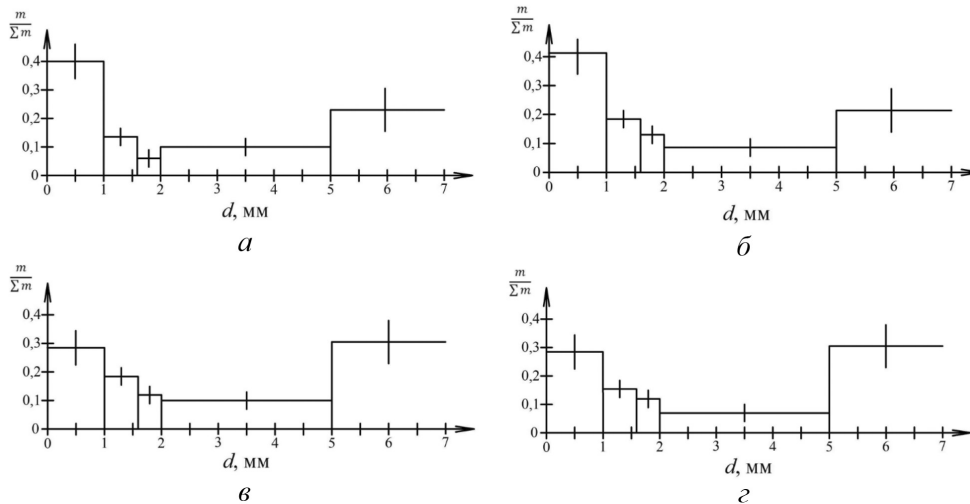


Рис. 2. Гистограмма распределения частиц коры, измельченных в молотковой дробилке при различной начальной влажности, %: *a* – 25; *б* – 35; *в* – 45; *г* – 55 (*d* – диаметр частиц)
 Fig. 2. The histogram of the distribution of bark particles grinded in a hammer grinder at different initial moisture content, %: *a* – 25; *б* – 35; *в* – 45; *г* – 55 (*d* – particle diameter)

Визуальный анализ частиц на ситах показывает, что частицы размером более 2 мм представляют практически чистую бересту, а частицы менее 1 мм – это в основном луб коры с небольшой примесью бересты. Поэтому сепарированность измельченных частиц целесообразно исследовать в диапазоне их размеров 1–2 мм. Для этих целей измельченные частицы коры распределены на 3 фракции: мелкая – менее 1 мм; средняя – 1–2 мм; крупная – более 2 мм.

Обработкой полученных гистограмм построены зависимости выхода удельных фракций от начальной влажности коры (рис. 3).

Анализ приведенных зависимостей свидетельствует, что в диапазоне влажности 42–52 % достигается максимальный размер крупной фракции $d > 2$ мм, в которой содержится большое количество бересты с бетулином и минимальна мелкая фракция, т. е. для повышения выхода бересты кору следует увлажнять до указанного значения.

На рис. 4 показаны экспериментальные и расчетные (4) зависимости плотности луба и бересты от влажности.

Среднеквадратичное отклонение расчетных зависимостей от экспериментальных данных не превышает 18 %. Анализ кривой говорит о том, что плотность луба при влажности больше 35 % превышает плотность воды, при этом плотность бересты составляет менее 590 кг/м³, т. е. при измельчении коры с влажностью 42–52 % возможна гравитационная сепарация в водной среде отстаиванием.

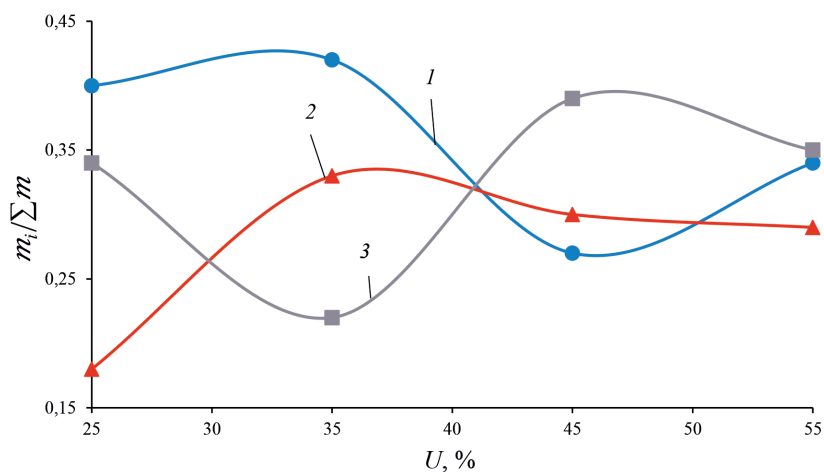


Рис. 3. Выход удельных фракций от начальной влажности коры: 1 – мелкая фракция; 2 – средняя; 3 – крупная

Fig. 3. The yield of specific fractions from the initial moisture content of the bark: 1 – fine fraction; 2 – medium; 3 – large

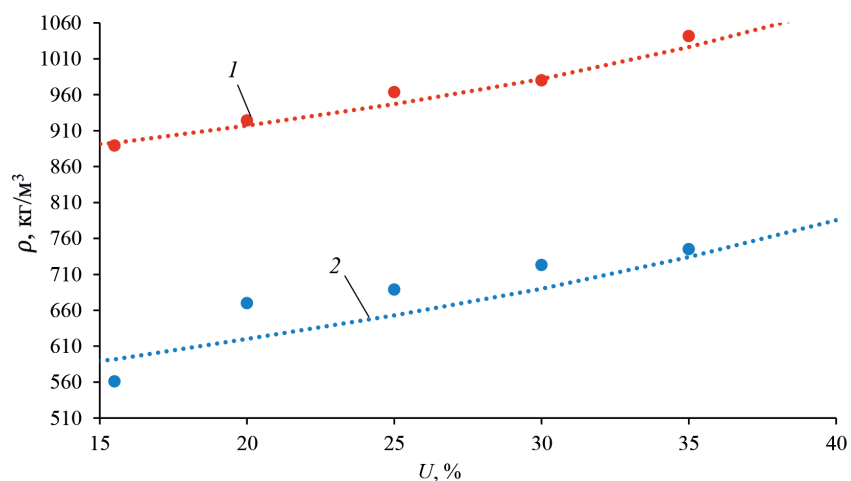


Рис. 4. Зависимость плотности от влажности частиц: 1 – луб; 2 – береста

Fig. 4. The dependence of density on moisture content in the particles: 1 – bast; 2 – birch bark

На рис. 5 приведены экспериментальные кривые влагопоглощения для луба и бересты при нормальной температуре.

Анализ кривых свидетельствует, что береста в отличие от луба значительно медленнее поглощает воду. Это связано с тем, что в бересте содержится до 40 % нерастворимого в воде бетулина. Вышеприведенное позволяет сделать вывод о возможности сепарации бересты от луба путем погружения измельченной коры в воду.

На рис. 6 представлены кривые зависимости среднего выхода удельных масс фракций от продолжительности измельчения в молотковой дробилке, полученные обработкой гистограмм распределения частиц коры с начальной влажностью 42–55 %.

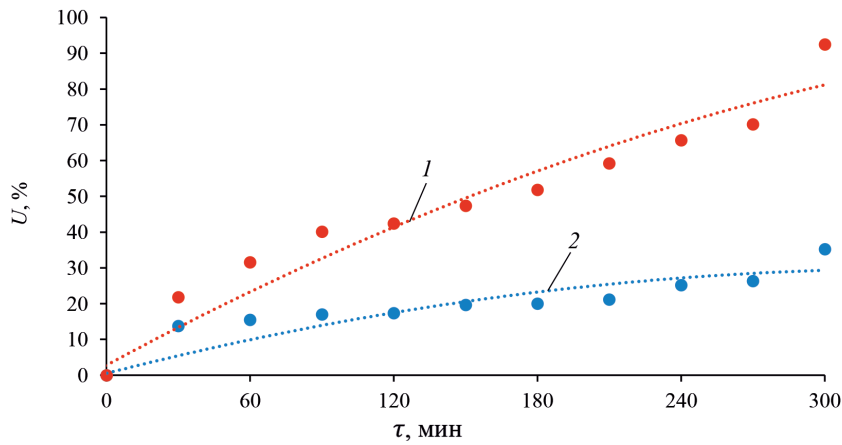


Рис. 5. Кинетика влагопоглощения: 1 – луб; 2 – береста

Fig. 5. The kinetics of moisture absorption: 1 – bast; 2 – birch bark

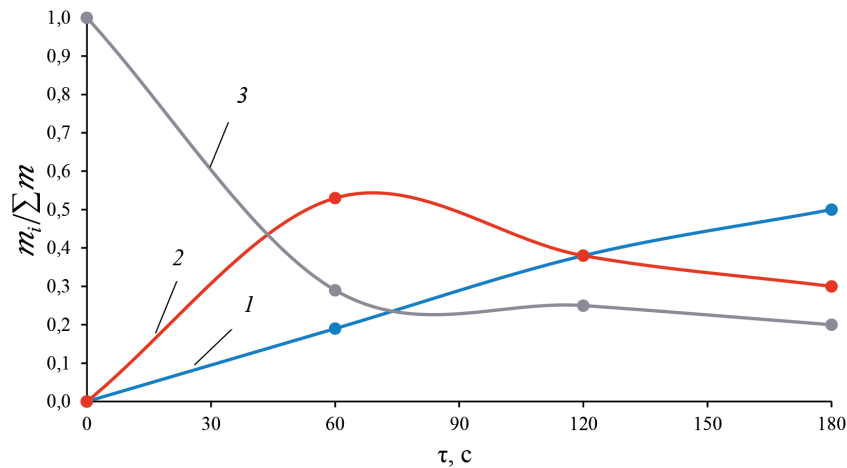


Рис. 6. Зависимость выхода удельных масс фракций от продолжительности измельчения в молотковой дробилке: 1 – мелкая фракция; 2 – средняя; 3 – крупная

Fig. 6. The dependence of the yield of specific gravities of the fractions on the duration of grinding in a hammer grinder: 1 – fine fraction; 2 – medium; 3 – large

Анализ кривых говорит о том, что с увеличением продолжительности измельчения коры более 90 с растет удельный выход мелкой фракции, который приводит к большим потерям бересты. При измельчении в течение менее 45 с в частицах с размерами более 5 мм визуализируется наличие луба, т. е. происходит некачественная сепарация. Оптимальная продолжительность процесса при использовании молотковой дробилки со скоростью вращения ротора 1500 об./мин составляет 45–90 с, при этом наблюдается максимальный выход средней фракции. Рациональная продолжительность измельчения в молотковых дробилках других типов может быть определена в соответствии с приведенным примером.

На рис. 7 показаны гистограммы интенсивности осаждения измельченной коры различных размеров во времени. Интенсивность осаждения характеризуется объемом частиц луба (см^3), выпавших в осадок за единицу времени (с), и определяется в соответствии с соотношением (5).

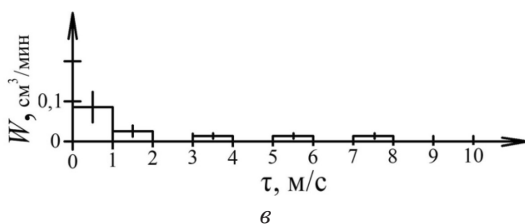
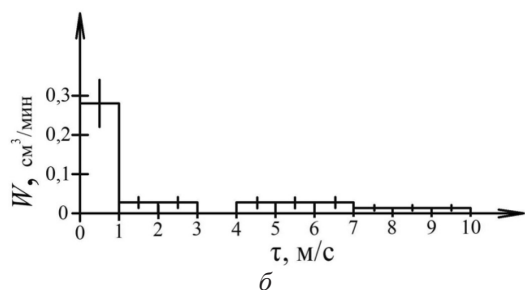
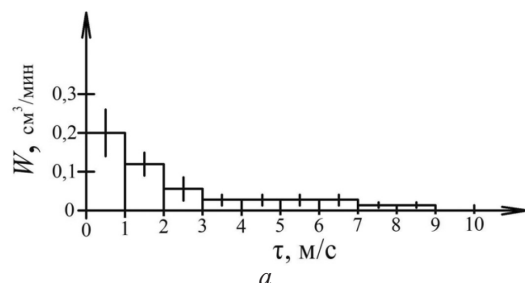


Рис. 7. Гистограммы интенсивности осаждения измельченной коры: *a* – мелкая фракция; *б* – средняя; *в* – крупная
Fig. 7. The histograms of the intensity of sedimentation of grinded bark: *a* – fine fraction; *б* – medium; *в* – large

Анализ приведенных данных показывает, что интенсивность осаждения луба различается в зависимости от размеров частиц. Частицы луба быстро впитывают в себя воду и уходят в осадок в течение 8–10 мин. За это время береста, при ее наличии, не успевает набрать влагу, ее плотность меньше плотности воды, и она всплывает на поверхность.

При размере частиц менее 1 мм (рис. 7, *a*) наблюдается плавное снижение интенсивности осаждения луба в течение 9 мин, что объясняется плохой впитываемостью слоя мелких частиц без их предварительного перемешивания. Мелкие частицы обладают большей адгезией между собой, делая слой частиц менее проницаемым для воды.

При размере частиц 1–2 мм (рис. 7, *б*) наблюдается массовое осаждение измельченных частиц луба в течение 1-й минуты. Это объясняется более быстрой смачиваемостью средней фракции вследствие всплывания бересты из слоя измельченных частиц коры и возникающего при этом естественного перемешивания. Объем всплывших частиц в данном случае составляет $\approx 30\%$.

При размере частиц более 2 мм (рис. 7, *в*) по причине небольшого содержания луба интенсивность осаждения частиц мала. Объем осажденного луба из крупной фракции не превышает 4 %.

Заключение

Получена кинетическая зависимость влаго- и водопоглощения коры березы от температуры процесса измельчения, позволяющая рекомендовать рациональный режим увлажнения сухой коры березы.

Выявлена влажность коры березы, при которой отмечается максимальный выход фракции, подлежащей сепарации.

Получены зависимости плотности бересты и луба от влажности, показывающие, что при влажности измельченной коры более 35 % происходит гравитационная сепарация бересты от луба в водной среде.

Анализ результатов исследований свойств коры березы, влияющих на сепарацию бересты от луба, выявил целесообразность измельчения коры в молотковой дробилке со скоростью вращения ротора 1500 об./мин с влажностью материала 42–52 % в течение 45–90 с при дальнейшей классификации измельченных частиц на 3 фракции: крупную с размерами частиц более 2 мм с преимущественным содержанием бересты; среднюю с размерами частиц 1–2 мм с содержанием бересты более 30 %; мелкую с частицами менее 1 мм с превалированием в составе луба.

Бересту из средней фракции следует выделить гравитационным осаждением в воде в течение 3–10 мин.

Предложенные оптимальные режимные параметры сепарации бересты от луба позволяют получить конечные продукты, в частности бетулин, более высокого качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Артемов В.А., Ершова А.С., Буриндин В.Г., Власов Н.Г. Исследование влияния содержания луба коры древесины березы на физико-механические свойства пластиков без связующих // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1. С. 171–177.

Artyomov V.A., Ershova A.S., Buryndin V.G., Vlasov N.G. Investigation of the Effect of Birch Bark Bast Content on the Physical and Mechanical Properties of Plastics without Resins. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2024, no. 1, pp. 171–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2024-1-171-177>

2. Бадогина А.И., Третьяков С.И., Кутакова Н.А., Коптелова Е.Н. Исследование кинетических закономерностей процесса СВЧ-экстракции луба в сравнении с березовой корой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 164–175.

Badogina A.I., Tretyakov S.I., Kutakova N.A., Koptelova E.N. The Comparison of Kinetics of Microwave-Assisted Extraction of Bast and Birch Bark. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 164–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.164>

3. Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122.

Bartalev S.A., Stytsenko F.V. An Assessment of the Forest Stands Destruction by Fires Based on the Remote Sensing Data on a Seasonal Distribution of Burnt Areas. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2021, no. 2, pp. 115–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821020029>

4. Гаврилюк Е.А., Королева Н.В., Карпухина Д.А., Сочилова Е.Н., Ершов Д.В. Геопространственное моделирование биометрических и структурных характеристик лесов

Брянской области на основе спутниковых и выборочных лесотаксационных данных // Лесоведение. 2021. № 6. С. 609–626.

Gavrilyuk E.A., Koroleva N.V., Karpukhina D.A., Sochilova E.N., Ershov D.V. Geospatial Modeling of Biometric and Structural Forest Attributes in the Bryansk Oblast Based on Satellite Imagery and Selective Inventory Data. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2021, no. 6, pp. 609–626. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S002411482106005X>

5. Житков А.В., Мазарский С.М. Хранение и подготовка древесного сырья в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 224 с.

Zhitkov A.V., Mazarskij S.M. *Storage and Preparation of Wood Raw Materials in Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 224 p. (In Russ.).

6. Левданский В.А., Кузнецов Б.Н., Полежаева Н.И. Влияние активации коры березы перегретым паром на выход и состав экстрактов, содержащих бетулин и дубильные вещества // Химия растит. сырья. 2005. № 2. С. 15–20.

Levdanskij V.A., Kuznetsov B.N., Polezhaeva N.I. The Effect of Activation of Birch Bark with Superheated Steam on the Yield and Composition of Extracts Containing Betulin and Tannins. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2005, no. 2, pp. 15–20. (In Russ.).

7. Павлова О.О. Возможности применения бетулина у больных хроническим гепатитом С // Вят. мед. вестн. 2006. № 2. С. 53.

Pavlova O.O. Possibilities of Using Betulin in Patients with Chronic Hepatitis C. *Vyatskij meditsinskij vestnik* = Medical Newsletter of Vyatka, 2006, no. 2, p. 53.

8. Патент № 78328. Способ отделения бересты от березовой коры: № 393230: заявл. 12.03.1949; опубл. 01.01.1950 / И.Г. Поварин; заявитель И.Г. Поварин.

Povarin I.G. *Method for Separating Birch Bark from Birch Bark*. Patent USSR, no. 78328, 1950. (In Russ.).

9. Патент №1428576. Способ переработки березовой коры на бересту и луб: № 1219356: заявл. 20.04.1987; опубл. 30.04.1989 / В.Е. Воскресенский, М.Б. Маркович, Г.Д. Кзак, К.Н. Токарева; заявитель Ленинградск. лесотехн. акад. им. С.М. Кирова.

Voskresenskij V.E., Markovich M.B., Kzak G.D., Tokareva K.N. *Method of Processing Birch Bark into Birch Bark and Bast*. Patent USSR, no. 1428576, 1989. (In Russ.).

10. Патент № 2288093 С1 РФ, МПК В27L 11/02. Способ получения бересты: № 2004136877/12: заявл. 16.12.2004; опубл. 27.11.2006. Бюл. № 33 / В.В. Балакшин, А.Н. Чистяков; заявитель ООО «Березовый мир».

Balakshin V.V., Chistyakov A.N. *Method of Obtaining Birch Bark*. Patent RF, no. 288093 С1, 2006. (In Russ.).

11. Патент № 2305550 С1 РФ, МПК А61К 36/13. Способ переработки березовой коры: № 2006137030/15: заявл. 19.10.2006; опубл. 10.09.2007. Бюл. № 25 / Г.В. Сироткин, А.Р. Мифтахов, Ю.А. Кульгашов, Н.Н. Махова, М.В. Толина; заявитель Г.В. Сироткин.

Sirotkin G.V., Miftakhov A.R., Kul'gashov Yu.A., Makhova N.N., Tolina M.V. *Method of Processing Birch Bark*. Patent RF, no. 2305550 С1, 2007. (In Russ.).

12. Патент № 2618892, МПК А61К 36/185, В01D 11/02, А61К 129/00. Способ комплексной переработки коры березы: № 2016120506: заявл. 25.05.2016; опубл. 11.05.2017. Бюл. № 14 / Б.Н. Кузнецов, И.Г. Судакова, С.А. Кузнецова, Л.И. Гришечко, Г.П. Скворцова, Е.В. Веприкова, В.А. Левданский; заявитель ФИЦ КНЦ СО РАН.

Kuznetsov B.N., Sudakova I.G., Kuznetsova S.A., Grishechko L.I., Skvortsova G.P., Veprikova E.V., Levdanskij V.A. *Method of Complex Processing of Birch Bark*. Patent RF, no. 2618892, 2017. (In Russ.).

13. Патент № 2683634 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00, В01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2018116921: заявл. 07.05.2018; опубл. 29.03.2019 / А.В. Сафина, Д.Ф. Зиатдинова, Н.Ф. Тимербаев, Д.М. Сайфутдинов, Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, Г.Р. Арсланова, Д.А. Шайхутдинова, Д.Р. Абдуллина; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Safina A.V., Ziatdinova D.F., Timerbaev N.F., Sajfutdinov D.M., Safin R.R., Safin R.G., Arslanova G.R., Shajkhutdinova D.A., Abdullina D.R. *Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. 2683634 C1, 2019. (In Russ.).

14. Сафина А.В., Зиятдинова Д.Ф., Назипова Л.Р., Сафин Р.Г., Валеев К.В. Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 195–207.

Safina A.V., Ziatdinova D.F., Nazipova L.R., Safin R.G., Valeev K.V. The Engineering Procedure for Calculating the Plant for Betulin Extraction from Birch Bark. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 195–207. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-195-207>

15. Третьяков С.И., Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Владимирова Т.М., Богданович Н.И. Бетулин: получение, применение, контроль качества: моногр. Архангельск: САФУ, 2015. 180 с.

Tret'yakov S.I., Koptelova E.N., Kutakova N.A., Vladimirova T.M., Bogdanovich N.I. *Betulin: Production, Application, Quality Control*: Monograph. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2015. 180 p. (In Russ.).

16. Черняева Г.Н., Долгодворова С.Я., Бондаренко С.М. Экстрактивные вещества березы. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО РАН, 1986. 123 с.

Chernyaeva G.N., Dolgodvorova S.Ya., Bondarenko S.M. *Extractive Substances of Birch*. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), 1986. 123 p. (In Russ.).

17. Шегельман И.Р., Кузнецов А.В. Эффективное использование лесных ресурсов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. 88 с.

Shegel'man I.R., Kuznetsov A.V. *Efficient Use of Forest Resources*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2008. 88 p. (In Russ.).

18. Шегельман И.Р., Скадорва И.В. Комплексное использование лесных ресурсов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2000. 40 с.


Shegel'man I.R., Skadorva I.V. *Integrated Use of Forest Resources*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2000. 40 p. (In Russ.).

19. Krasutsky P.A. Birch Bark Research and Development. *Natural Product Reports*, 2006, vol. 23, iss. 6, pp. 919–942. <https://doi.org/10.1039/B606816B>

20. Krasutsky P.A., Carlson R.M., Nesterenko V.V., Kolomitsyn I.V., Edwardson C.F. *Birch Bark Processing and the Isolation of Natural Products from Birch Bark*. Patent US, no. 2002/0043577 A1, 2002.

21. Réh R., Krišťák L., Sedláčik J., Bekhta P., Božiková M., Kunecová D., Vozárová V., Tudor E.M., Antov P., Savov V. Utilization of Birch Bark as an Eco-Friendly Filler in Urea-Formaldehyde Adhesives for Plywood Manufacturing. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 4, art. no. 511. <https://doi.org/10.3390/polym13040511>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья
УДК 676.273.3
DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-210-220

Конструкционная прочность изделий из гофрированного картона

И.А. Косарев[✉], мл. науч. сотр.; ResearcherID: [KRO-8581-2024](https://orcid.org/0009-0005-5306-8046),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5306-8046>

А.В. Гурьев, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [H-1586-2019](https://orcid.org/0000-0002-3372-3286),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; i.kosarev@narfu.ru[✉], a.guriev@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.09.24 / Одобрена после рецензирования 26.10.24 / Принята к печати 31.10.24

Аннотация. Исследована конструкционная прочность изделий из гофрированного картона с целью оптимизации параметров, влияющих на устойчивость и жесткость материалов при торцевом сжатии. Произведены лабораторные образцы, отличающиеся количеством элементов (от 1 до 6) и углом расположения линий склейки вершин гофров (от 0° до 90° с шагом 15°) относительно машинного направления. Разработана методика оценки конструкционной прочности и устойчивости образцов с различными параметрами в условиях торцевого сжатия. Результаты показали прямую зависимость конструкционной прочности изделий от угла наклона гофров и количества элементов изделия. Установлены предельные деформации образцов при сжатии, а также ключевые зависимости между этими параметрами. Особое внимание уделено коэффициенту вариации между предельной деформацией и углом расположения линий гофров, что позволило более глубоко изучить разрушение изделий при торцевом сжатии. Определены оптимальные параметры для повышения жесткости и прочности изделий, даны рекомендации по выбору угла расположения линий гофров и количества элементов, которые могут быть использованы для улучшения производственных процессов. Исследовано влияние коэффициента вариации предельной деформации на сопротивление торцевому сжатию, что позволило спрогнозировать направления для оптимизации методики испытаний образцов. Полученные результаты могут найти широкое применение в сфере использования изделий из гофрированного картона в различных отраслях промышленности, требующих высоких прочностных характеристик этого упаковочного материала.

Ключевые слова: конструкционная прочность, угол расположения линий склейки вершин гофров, гофрированный картон, высокопрочные изделия, торцевое сжатие

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта «Разработка технологии производства высокопрочных изделий из гофрокартона», фонд содействия инновациям (договор № 17816ГУ/2022 от 16.05.2022) и научно-исследовательской работы по теме «Прогнозирование конструкционной прочности изделий из гофрированного картона на основе его деформационных показателей в условиях арктического применения», САФУ им. М.В. Ломоносова (Д-388.2024 от 22.04.2024).

Для цитирования: Косарев И.А., Гурьев А.В. Конструкционная прочность изделий из гофрированного картона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 210–220. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-210-220>

Original article

Structural Strength of Corrugated Cardboard Products

Ivan A. Kosarev[✉], Junior Research Scientist; ResearcherID: [KRO-8581-2024](https://orcid.org/0009-0005-5306-8046),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5306-8046>

Aleksandr V. Guriev, Doctor of Engineering, Associate Prof.; ResearcherID: [H-1586-2019](https://orcid.org/0000-0002-3372-3286),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; i.kosarev@narfu.ru[✉], a.guriev@narfu.ru

Received on September 10, 2024 / Approved after reviewing on October 26, 2024 / Accepted on October 31, 2024

Abstract. The structural strength of corrugated cardboard products has been investigated in order to optimize the parameters affecting the stability and rigidity of materials under edgewise compression. Laboratory samples have been produced, differing in the number of elements (from 1 to 6) and the angle of flute peak adhesion line orientation (from 0° to 90° in 15° increments) relative to the machine direction. A method has been developed to evaluate the structural strength and stability of samples with various parameters under edgewise compression conditions. The results have shown a direct dependence of the structural strength of the products on the angle of inclination of the flutes and the number of product elements. The ultimate strains of the samples under compression, as well as the key dependencies between these parameters, have been established. Special attention has been paid to the coefficient of variation between the ultimate strain and the angle of flute line orientation, which has allowed for a more in-depth study of the failure of products under edgewise compression. Optimal parameters for increasing the rigidity and strength of products have been determined, and recommendations have been given on the choice of the angle of flute line orientation and the number of elements that can be used to improve production processes. The effect of the coefficient of variation value of ultimate strain on the resistance to edgewise compression has been investigated, which had made it possible to predict directions for optimizing the testing methodology for samples. The results obtained can be widely used in the field of the use of corrugated cardboard products in various industries requiring high strength characteristics of this packaging material.

Keywords: structural strength, flute peak adhesion line angle, corrugated cardboard, high-strength products, edgewise compression

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project “Development of a Technology for the Production of High-Strength Corrugated Cardboard Products”, the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (agreement no. 17816GU/2022 dated 05/16/2022) and research work on the topic “Forecasting the Structural Strength of Corrugated Cardboard Products Based on its Deformation Characteristics in Arctic Conditions”, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (D-388.2024 dated 04/22/2024).

For citation: Kosarev I.A., Guriev A.V. Structural Strength of Corrugated Cardboard Products. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 210–220. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-210-220>

Введение

В последние годы сфера упаковки и тары является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей мировой экономики. Спрос на упаковку из гофрированного картона постоянно увеличивается благодаря активному развитию пищевой и химической промышленности, а также росту производства вычислительной и бытовой техники [5]. Гофрокартон широко используют для упаковки и защиты товаров. Он занимает более 50 % рынка тары благодаря возможности многократной переработки, экологичности, легкости, гибкости и надежности [7, 10], а также экономичности и универсальности [17]. К перечисленным достоинствам такой упаковки следует добавить и высокую амортизацию нагрузки [2, 3].

Экологическая безопасность гофрированного картона является его значительным преимуществом, т. к. этот материал относится к биоразлагаемым, перерабатываемым и требует меньше энергии и ресурсов для производства по сравнению с альтернативными упаковочными материалами, такими как пластик или стекло [11]. В условиях ужесточающихся экологических стандартов и требований к устойчивому развитию, использование гофрированного картона становится все более востребованным.

Гофрированный картон также позволяет снизить затраты на транспортировку и хранение продукции, что особенно актуально для сельскохозяйственных и промышленных предприятий. Разработка и производство высокопрочных изделий из гофрированного картона имеют значительный потенциал с точки зрения как экологической безопасности, так и экономической выгоды. Например, исследования показывают, что снижение массы упаковки и улучшение ее прочностных характеристик ведут к уменьшению транспортных расходов и повышению эффективности логистических процессов [9].

Гофрокартон состоит из чередующихся плоских (лайнер) и гофрированных (флютинг) слоев, что обеспечивает его уникальные механические свойства [1, 18]. В зависимости от количества плоских и гофрированных слоев гофрированный картон подразделяют на несколько типов. Двухслойный гофрокартон состоит из 1 плоского и 1 гофрированного слоя и имеет низкие показатели сопротивления торцевому сжатию. Трехслойный гофрокартон сформирован 1 гофрированным слоем, помещенным между 2 плоскими слоями, и отличается легкостью и гибкостью, что делает его пригодным для упаковки широкого спектра промышленных и бытовых товаров. Пятислойный гофрокартон включает 2 гофрированных и 3 плоских слоя, что значительно повышает его устойчивость к торцевому сжатию и позволяет выдерживать нагрузки 17 кН/м и выше. Семислойный картон имеет 3 гофрированных и 4 плоских слоя, это придает ему наивысшие показатели сопротивления торцевому сжатию вдоль гофров по сравнению с остальными видами гофрокартона.

Несмотря на то, что содержание клея в массе гофрокартона составляет лишь 2–3 %, его качество существенно влияет на конечный результат производства [15]. При этом клей не должен проникать глубоко в основу, т. к. это увеличивает его расход и может привести к снижению прочности сцепления с материалом [14]. Требования к гладкости волокнистой поверхности картона зависят от наносимого клея и способа его нанесения [13].

В Российской Федерации нормы для изделий из гофрированного картона прописаны в стандарте ГОСТ 9140–90. Несмотря на это, механические характеристики, применяемые в отрасли для оценки качества гофрокартона, такие

как сопротивление продавливанию и торцевому сжатию по ГОСТ 52901–2007, не отражают полного спектра сил, действующих на материал под нагрузкой. Для повышения качества картона и снижения расходов важно учитывать его деформационные и конструкционные свойства [4, 21]. В производстве этого материала применяются различные виды целлюлозы, что позволяет добиться целевых прочностных характеристик и толщины [12, 19]. Одним из ключевых требований к гофрированному картону является соответствие его прочности ГОСТ 7376–89. Для улучшения качества материала следует использовать различные технологии и методы поверхностной обработки [8]. Например, современные технологии производства включают в себя применение высококачественной целлюлозы и оптимизацию процессов гофрирования, что приводит к повышению прочностных характеристик материала [6].

Исследование торцевого сжатия изделий из гофрированного картона необходимо для определения оптимальных конструктивных параметров, таких как угол расположения линий гофров и количества элементов. Понимание этих факторов позволит создавать высокопрочные изделия, способные выдерживать большие нагрузки. Возможно получение гофрокартона с конструкционной прочностью, сопоставимой с прочностью при сжатии пластика или древесины, т. е. исследуемый материал способен конкурировать с ними и, тем самым, увеличивать востребованность продукции целлюлозно-бумажной отрасли [20]. Следовательно, данное направление научных работ актуально и перспективно.

Целью данного исследования является оценка конструкционной прочности изделий из гофрированного картона при торцевом сжатии с различными углами расположения линий склейки вершин гофров относительно машинного направления и количеством элементов изделий.

Объекты и методы исследования

Исследованы лабораторные образцы из гофрированного картона марки П32 с профилем ВС ГОСТ Р 52901–2007. Изделия производились по принципу запатентованной полезной модели [16] путем нарезки элементов на лазерно-гравировальном станке и склеивания их между собой с равномерным нанесением клея ПВА. Было выполнено по 10 шт. образцов с 1...6 элементами. Один элемент представляет собой стандартный образец для определения сопротивления торцевому сжатию гофрированного картона по методу ЕСТ. Длина элемента – $100 \pm 0,5$ мм, ширина – $25 \pm 0,5$ мм (рис. 1).

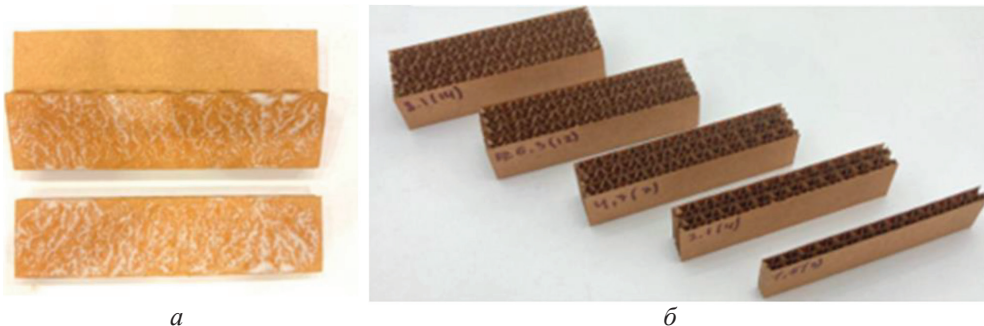


Рис. 1. Образцы из гофрокартона марки П32: *а* – образцы с нанесенным клеем; *б* – готовые к испытаниям образцы

Fig. 1. The samples of P32 corrugated cardboard: *a* – samples with the glue applied; *b* – samples ready for testing

Образцы имели различное направление гофрированного слоя относительно длины и ширины:

линии вершин гофров сориентированы вдоль короткой стороны образца, т. е. она соответствует поперечному направлению гофрокартона (CD);

линии вершин гофров сориентированы вдоль длинной стороны образца, а значит, короткая соответствует машинному направлению гофрокартона (MD).

Помимо изделий с ориентацией гофров вдоль короткой и длинной сторон образца с помощью лазерной резки выполнены образцы с углом расположения линий склейки вершин гофров 15° , 30° , 45° , 60° и 75° по отношению к машинному направлению (рис. 2, 3).

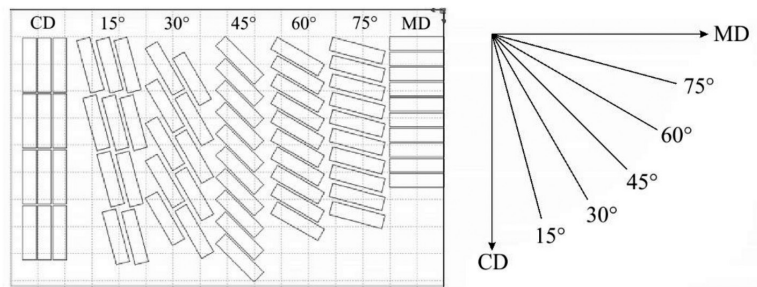


Рис. 2. Рабочий эскиз для лазерной резки элементов изделий с различным углом расположения линий склейки гофров

Fig. 2. The working sketch for laser cutting of product elements with different angles of flute peak adhesion line orientation

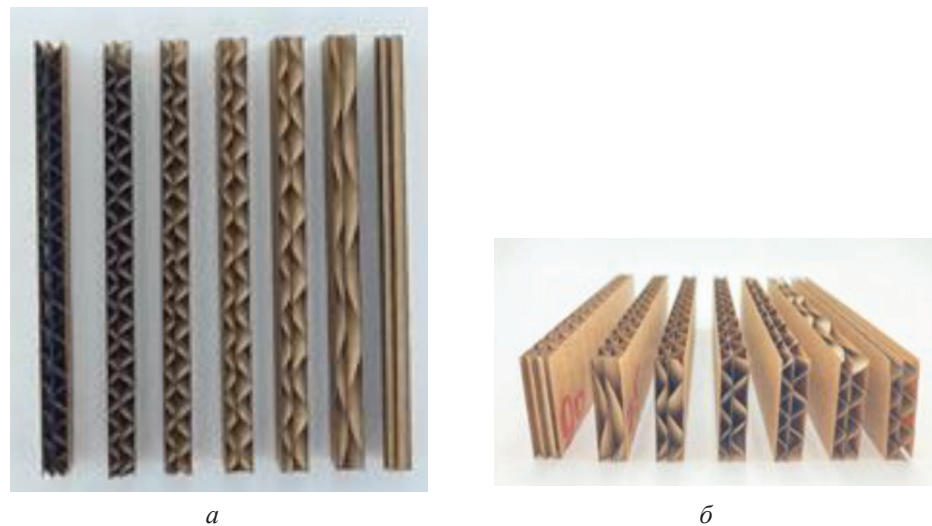


Рис. 3. Готовые элементы с направлением гофров от CD до MD с шагом в 15° :
a – вид сверху; *б* – вид спереди

Fig. 3. The finished elements with flute direction from CD to MD in 15° increments:
a – top view; *б* – front view

Измерение разрушающего усилия при сжатии образцов проводилось с использованием лабораторного оборудования FRANK-PTI Crush Resistance Tester (Германия) и TS F1850 SHIMATZU AGX-S (Япония).

Всего было проведено по 10 испытаний, количество образцов каждой серии соответствует ГОСТ 20683–97.

Результаты исследования и их обсуждение

Кривые, отображающие среднее значение ЕСТ для изделий из гофрированного картона, демонстрируют различную степень линейности и искривления в зависимости от угла расположения гофров относительно машинного направления. Кривые, соответствующие углам 0° и 15° , значительно отклоняются от линейности, что свидетельствует о низкой конструкционной прочности образцов. В образцах, угол расположения линий склейки вершин гофров в которых приближен к машинному направлению, функция на графике представляет собой квадратичную кривую, что можно определить по ее изгибу. Это отчетливо прослеживается при углах склейки 0° и 15° , где искривления наиболее выраженные.

С увеличением угла до 60° и 75° кривые становятся более линейными, что указывает на стабилизацию и повышение конструкционной прочности. При этих значениях искривление практически отсутствует и прочность приближена к максимальной. Последнее особенно важно для статичных нагрузок, при которых требуются высокая надежность и устойчивость.

Угол расположения линий гофров демонстрирует значительное влияние на прочность изделия. Образец из 6 элементов с углом расположения гофров 0° сопоставим по прочности с образцом из 2 элементов с углом 90° . Это позволяет сделать вывод о том, что конкретный угол расположения линий склейки вершин гофров может существенно повысить эффективность использования тех или иных образцов в зависимости от поставленной задачи. Например, для достижения высокой прочности следует выбрать меньшее количество элементов с поперечным направлением гофров, что снизит затраты при высоких показателях сопротивления торцевому сжатию.

Аппроксимирующие прямые отображают зависимости среднего значения ЕСТ для гофрированного картона от количества элементов изделий. Они дают возможность не только точно определять показатель ЕСТ для изделий с различным количеством элементов, но и оценивать влияние конструкционных изменений на прочность конечного продукта.

Исследования, включающие испытания элементов изделий из гофрированного картона для определения устойчивости к торцевому сжатию, стали основой для прогнозирования конструкционной прочности и сопротивления сжатию этих изделий. Изучена деформация образцов при торцевом сжатии до разрушения. Собранные данные для образцов с различным количеством элементов и углом расположения линий склейки вершин гофров были сведены в один график (рис. 4).

По рис. 4 видно, что все показатели находятся в пределах допустимых значений: связь между независимой и зависимой переменной в уравнениях регрессионной модели сильная.

Данные прежде всего базируются на оценке уровня предельной деформации сжатия ($\epsilon_{сж}$, %) и важны для последующего численного моделирования образцов и сравнения результатов между собой для определения точности прогнозирования.

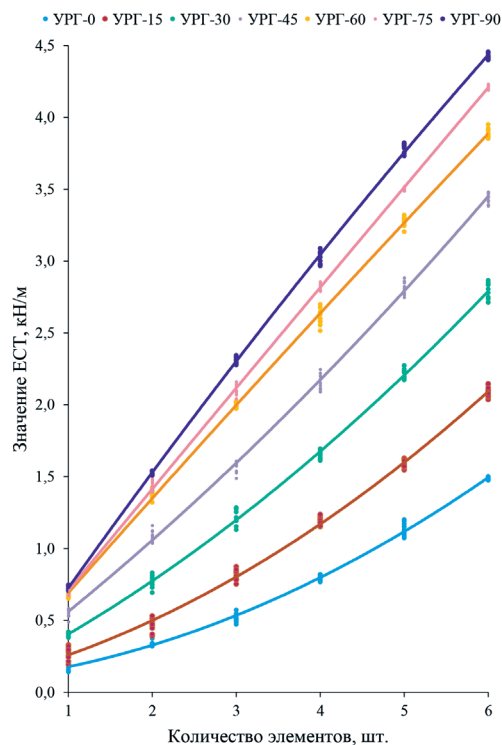


Рис. 4. Зависимость ЕСТ образцов с различным углом расположения линий склейки вершин гофров (УРГ, ...°) от количества элементов

Fig. 4. The dependence of ECT of samples with different angles of flute peak adhesion line orientation (УРГ, ...°)

$$\varepsilon_{\text{сж}} = \left(\frac{l_0 - l_{\text{к}}}{l_0} \right) 100 \%,$$

l_0 – начальная высота образца; $l_{\text{к}}$ – высота после потери несущей способности.

Кроме того, изучение деформации элементов при торцевом сжатии до разрушения позволило выявить ключевые закономерности в изменении конструкционной прочности в зависимости от угла расположения гофров и количества элементов в изделии. Показатели предельной деформации образцов при сжатии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Предельная деформация образца при сжатии
The ultimate strain of a sample under compression

Количество элементов	Предельная деформация образца при сжатии, %, при угле расположения линий склейки вершин гофров, ...°						
	0 (MD)	15	30	45	60	75	90 (CD)
1	1,84	2,04	2,2	2,52	3,24	3,80	4,04
2	1,92	2,32	2,8	3,04	3,64	4,24	4,52
3	2,04	2,56	3,08	3,88	5,84	6,28	6,56
4	2,48	3,16	4,36	5,52	7,16	7,64	8,04
5	2,72	3,32	4,64	6,16	7,80	8,24	8,64
6	2,96	3,76	5,28	6,68	8,04	8,44	8,92

Для полноценного анализа предельной деформации образцов из гофрированного картона при сжатии важно не только фиксировать средние значения,

но и понимать их дисперсию, а также предельные отклонения. Показатели предельной деформации образцов при различных углах наклона гофров и количестве элементов позволяют построить вариационный ряд, который отражает частоту возникновения различных деформаций в границах обсуждаемого эксперимента (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициент вариации предельной деформации при сжатии
в зависимости от угла расположения линий склейки вершин гофров
и количества элементов**

**The coefficient of variation of the ultimate strain under compression depending
on the angle of flute peak adhesion line orientation and the number of elements**

Количество элементов	Коэффициент вариации предельной деформации при сжатии, %, в зависимости от угла расположения линий склейки вершин гофров, ...°						
	0 (MD)	15	30	45	60	75	90 (CD)
1	7,6	6,8	6,7	6,5	5,9	5,3	3,9
2	7,2	6,0	5,2	4,6	4,3	3,6	3,3
3	6,4	5,3	4,9	4,2	3,0	2,7	2,4
4	4,9	4,2	3,6	3,4	2,7	2,3	1,8
5	3,6	3,0	2,6	2,3	1,8	1,4	1,0
6	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9	0,8	0,6

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что увеличение количества элементов в образце и угол расположения линий склейки вершин гофров, близкий к поперечному направлению, улучшают точность оценки конструкционной прочности изделий из гофрированного картона – погрешность при проведении испытаний не превышает 4 %.

Выводы

1. Для оценки конструкционной прочности изделий из гофрированного картона с различным углом расположения линий склейки вершин гофров и количеством элементов при торцевом сжатии может использоваться лабораторный анализ измерения ЕСТ гофрированного картона.

2. Для повышения жесткости и конструкционной прочности изделий из гофрированного картона рекомендуется применять поперечное направление гофров. Достижение максимальной прочности возможно при углах расположения линий гофров от 60°, в то время как меньшие углы, особенно 0° и 15°, приводят к значительному снижению прочности. Влияние количества элементов и ориентации гофров на конструкционную прочность изделий из гофрированного картона при торцевом сжатии подтверждается лабораторными испытаниями.

3. Зависимость значений ЕСТ изделия хорошо аппроксимируется полиномом первой степени. Угол расположения линий склейки вершин гофров в образце относительно машинного направления оказывает значительное влияние на показатель ЕСТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аликін В.П. Физико-механические свойства природных целлюлозных волокон. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 140 с.
Alikin V.P. *Physical and Mechanical Properties of Natural Cellulose Fibers*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 140 p. (In Russ.).
2. Антибас И.Р., Партко С.А. Сравнение амортизирующих свойств гофрированной картонной упаковки разной структуры при действии вертикальной нагрузки // Сб. статей 8-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2015». Ростов-на-Дону, 2015. С. 232–235.
Antypas I.R., Partko S.A. Comparison of Damping Properties of Corrugated Cardboard Packaging of Different Structures under Vertical Load. *Collection of Articles of the 8th International Scientific and Practical Conference within the Framework of the 18th International Agro-Industrial Exhibition "Interagromash-2015"*. Rostov-on-Don, 2015, pp. 232–235. (In Russ.).
3. Антибас И.Р., Партко С.А., Сиrotенко А.Н. Влияние формы гофрированного картона на амортизирующие свойства упаковки // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 16, № 1(84). С. 36–42.
Antypas I.R., Partko S.A., Sirotenko A.N. Effect of Corrugated Cardboard Shape on the Packing Damping Properties. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University, 2016, vol. 16, no. 1(84), pp. 36–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/18156>
4. Гурьев А.В., Комаров В.И., Елькин В.П., Касьяненко В.В. Методы оценки качества компонентов гофрированного картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 1996. № 7–8. С. 16–18.
Guriev A.V., Komarov V.I., Elkin V.P., Kas'yanenko V.V. Methods for Assessing the Quality of Corrugated Cardboard Components. *Tselluloza. Bumaga. Karton*, 1996, no. 7–8, pp. 16–18. (In Russ.).
5. Ефремов Н.Ф. Тара и ее производство. 2-е изд., доп. М.: МГУП, 2001. 312 с.
Efremov N.F. *Packaging and its Production*, 2nd ed., revised. Moscow, Moscow State University of Printing Arts, 2001. 312 p. (In Russ.).
6. Казаков Я.В. Характеристики деформативности как основополагающий критерий в оценке качества целлюлозно-бумажных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2015. 534 с.
Kazakov Ya.V. *Deformability Characteristics as a Fundamental Criterion in Assessing the Quality of Pulp and Paper Materials*: Doc. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2015. 534 p. (In Russ.).
7. Казаков Я.В., Гурьев А.В., Комаров В.И., Крыжановский О.А., Журавлева А.Н. Жесткость при изгибе гофрокартона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 6. С. 50–53.
Kazakov Yu.V., Guriev A.V., Komarov V.I., Kryzhanovskij O.A., Zhuravleva A.N. Bending Rigidity of Corrugated Cardboard. *Tselluloza. Bumaga. Karton*, 2006, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.).
8. Казаков Я.В., Комаров В.И., Лапина Н.В., Журавлева А.Н., Крыжановский А.О. Влияние климатических условий на сохранение уровня потребительских свойств гофрокартона // Теория и инновационные технологии бумажно-картонной продукции с использованием вторичного волокнистого сырья: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Караваево, 2007. С. 46–50.
Kazakov Yu.V., Komarov V.I., Lapina N.V., Zhuravleva A.N., Kryzhanovskij A.O. The Influence of Climatic Conditions on Maintaining the Level of Consumer Properties of Corrugated Cardboard. *Theory and Innovative Technologies of Paper and Cardboard*

Products Using Recycled Fibrous Raw Materials: Materials of the 8th International Scientific and Technical Conference. Karavaevo, 2007, pp. 46–50. (In Russ.).

9. Кирван М.Дж. Упаковка на основе бумаги и картона. СПб.: Профессия, 2008. 488 с. Kirwan M.J. *Paper and Paperboard Packaging.* St. Petersburg, Professiya Publ., 2008. 488 p. (In Russ.).

10. Комаров В.И., Гурьев А.В., Елькин В.П. Механика деформирования целлюлозных тароупаковочных материалов. Архангельск: АГТУ, 2002. 175 с.

Komarov V.I., Guriev A.V., Elkin V.P. *Mechanics of Deformation of Cellulose Packaging Materials.* Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2002. 175 p. (In Russ.).

11. Мартинес П. Экологическое воздействие упаковочных материалов // Журнал экологичной упаковки. 2018. № 10(1). С. 30–42.

Martinez P. Environmental Impact of Packaging Materials. *Zhurnal ekologichnoy upakovki*, 2018, no. 10(1), pp. 30–42. (In Russ.).

12. Михайлова О.С., Крякунова Е.В., Канарский А.В., Казаков Я.В., Манахова Т.Н., Дулькин Д.А. Влияние биомодифицированного картофельного крахмала на деформационные и прочностные свойства картона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 4. С. 157–164.

Mikhaylova O.S., Kryakunova E.V., Kanarskiy A.V., Kazakov Ya.V., Manakhova T.N., Dul'kin D.A. The Influence of Modified Potato Starch on the Cardboard Deformation and Strength Properties. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2016, no. 4, pp. 157–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.4.157>

13. Мишурина О.А., Пинчукова К.В., Глазкова Я.В., Кужугалдинова З. Анализ влияния качества целлюлозного сырья на прочностные и сорбционные свойства упаковочных видов картона // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исследований. 2017. № 1(часть 1). С. 9–13.

Mishurina O.A., Pinchukova K.V., Glazkova Ya.V., Kuzhugaldinova Z. Analysis of the Impact of Cellulose Raw Material Quality on the Strength and Sorption Properties of Packaging Types of Cardboard. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Basic Researches*, 2017, no. 1 (part 1), pp. 9–13. (In Russ.).

14. Мишурина О.А., Тагаева К.А. Исследование влияния композиционного состава по волокну на влагонепрочностные свойства исходного сырья при производстве картонных втулок // Актуал. проблемы совр. науки, техники и образования. 2013. Т. 1, № 71. С. 286–289.

Mishurina O.A., Tagaeva K.A. Study of the Influence of the Composite Composition by Fiber on the Wet-Strength Properties of the Raw Material in the Production of Cardboard Tubes. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2013, vol. 1, no. 71, pp. 286–289. (In Russ.).

15. Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Чупрова Л.В., Ершова О.В. Влияние химической природы проклеивающих компонентов на гидрофильные и гидрофобные свойства целлюлозных материалов // Соврем. проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 250.

Mullina E.R., Mishurina O.A., Chuprova L.V., Ershova O.V. Influences of Sizing Compound Chemistry on Hydrophilic and Hydrophobic Properties of Cellulosic Materials. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 6, p. 250. (In Russ.).

16. Патент RU 222 991 U1 РФ, МПК B65D 5/44. Высокопрочное изделие из гофрированного картона: заявл. 17.05.2023; опубл. 25.01.2024. Бюл. № 3 / И.А. Косарев.

Kosarev I.A. *Highly Durable Product Made of Corrugated Cardboard.* Patent RF no. RU 222 991 U1, 2024. (In Russ.).

17. Смолин А.С., Дубовый В.К., Комаров В.И., Казаков Я.В., Белоглазов В.И. Технология гофрокартона. 2-е изд., испр. и доп. СПб., 2019. 412 с.

Smolin A.S., Dubovyy V.K., Komarov V.I., Kazakov Ya.V., Beloglazov V.I. *Corrugated Cardboard Technology*: 2nd edition, revised and enlarged. St. Petersburg, 2019. 412 p. (In Russ.).

18. Grant J., Young J., Watson B. *Paper and Board Manufacture: a General Account of its History, Processes and Applications*. UK, London, Technical Division, British Paper and Board Industry Federation, 1978, pp. 166–183.

19. Hung D.V., Nakano Y., Tanaka F., Hamanaka D., Uchino T. Preserving the Strength of Corrugated Cardboard under High Humidity Condition Using Nano-Sized Mists. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, iss. 14, pp. 2123–2127. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.08.011>

20. Koskela S., Dahlbo H., Judl J., Korhonen M., Niinen M. Reusable Plastic Crate or Recyclable Cardboard Box? A Comparison of Two Delivery Systems. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 69, pp. 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.045>

21. Salavatian S., D’Orazio M., Di Perna C., Di Giuseppe E. Assessment of Cardboard as an Environment-Friendly Wall Thermal Insulation for Low-Energy Prefabricated Buildings. *Sustainable Building for a Cleaner Environment. Innovative Renewable Energy*. Springer, Cham, 2019, pp. 463–470. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94595-8_39

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors’ Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article