

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

4

2024

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

4

2024

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

- В.Ф. Коновалов, А.А. Габитова, А.К. Габделхаков, Д.А. Рафикова, Э.Р. Ханова.* Фенотипическая оценка клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесостепной зоне Башкирского Предуралья..... 9
- Н.В. Выводцев.* Ресурсный потенциал бархата амурского в Приамурско-Приморском хвойно-широколиственном районе..... 26
- Е.В. Dyomina, V.A. Savchenkova.* The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow)..... 37
- Н.С. Иванова, В.В. Фомин, С.В. Залесов, А.П. Михайлович.* Сравнительный анализ эколого-флористической классификации и лесных типологий России..... 49
- В.П. Коба, И.А. Крестьянишин, О.О. Коренькова.* Семенная продуктивность и качество семян *Pinus sylvestris* L. в лесных культурах на крымских яйлах.... 68
- В.М. Лебедев, Е.В. Лебедев.* Фотосинтез, минеральное питание и продуктивность лиственных и хвойных видов дендрофлоры центральной части Русской равнины..... 81
- В.Б. Придача, А.Н. Пеккоев, Я.А. Неронова.* Особенности роста и структуры древесины сосны на вырубке и под пологом древостоя в условиях Республики Карелии..... 92
- А.В. Остроухов.* Применение методов пространственного анализа при оценке степени горимости лесов Хабаровского края..... 106

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

- Л.Д. Бухтояров, С.В. Малюков, М.Н. Лысыч, М.А. Гнусов.* Имитационная модель дисковой лесопосадочной машины..... 119
- К.В. Ладейщиков, С.А. Чудинов.* Особенности эксплуатации лесовозных дорог в весенне-зимний период..... 134

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

- А.А. Прокопьев, Н.Р. Галяветдинов, Р.Р. Сафин.* Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя..... 147
- Н.П. Мидуков, Н.В. Евдокимов, В.С. Куров, В.В. Коршунов.* Удельные энергетические затраты на измельчение древесины при подготовке композита для 3D-печати..... 159

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- V. Moazami, A.Ya. Esbouei, H. Hatefnia.* Surface Treatment of Fiberboard Wood Pulp Mat with Dispersed Water (by the Example of Arian Sina MDF Company)..... 177
- Н.В. Примаков, В.В. Танюкевич.* Лесохозяйственные мероприятия в полезащитных лесных полосах Краснодарского края..... 185
- М.А. Зырянов, С.О. Медведев, А.П. Мохирев.* Повышение ресурсного потенциала древесного сырья..... 193
-



CONTENTS

FORESTRY

- V.F. Konovalov, A.A. Gabitova, A.K. Gabdelkhakov, D.A. Rafikova, E.R. Khanova.* Phenotypic Assessment of Clones of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Plus Trees in the Forest-Steppe Zone of the Bashkir Cis-Urals..... 9
- N.V. Vyvodtsev.* The Resource Potential of the Amur Cork Tree in the Priamur-Primorskiy Coniferous-Broadleaved Area..... 26
- E.B. Dyomina, V.A. Savchenkova.* The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow)..... 37
- N.S. Ivanova, V.V. Fomin, S.V. Zalesov, A.P. Mikhailovich.* Comparative Analysis of the Ecological-Floristic Classification and the Russian Forest Typologies..... 49
- V.P. Koba, I.A. Krest'yanishin, O.O. Koren'kova.* Seed Production and Seed Quality of *Pinus sylvestris* L. in Forest Plantations on the Crimean Yaylas... 68
- V.M. Lebedev, E.V. Lebedev.* Photosynthesis, Mineral Nutrition and Productivity of Deciduous and Coniferous Dendroflora Species in the Central Part of the Russian Plain..... 81
- V.B. Pridacha, A.N. Pekkoev, Ya.A. Neronova.* Features of the Growth and Structure of Pine Wood in the Felling Area and Under the Canopy of a Tree Stand in the Conditions of the Republic of Karelia..... 92
- A.V. Ostroukhov.* The Use of Spatial Analysis Methods in Assessing the Degree of Fire Frequency in Forests of the Khabarovsk Territory..... 106

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

- L.D. Bukhtoyarov, S.V. Malyukov, M.N. Lysych, M.A. Gnusov.* The Simulation Model of a Disk Tree-Planting Machine..... 119
- K.V. Ladeyshchikov, S.A. Chudinov.* The Peculiarities of the Operation of Logging Roads in the Spring-Winter Period..... 134

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

- A.A. Prokopiev, N.R. Galyavetdinov, R.R. Safin.* Performance Characteristics of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler..... 147
- N.P. Midukov, N.V. Evdokimov, V.S. Kurov, V.V. Korshunov.* Specific Energy Costs of Grinding Wood when Preparing a Composite for 3D-Printing..... 159

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- V. Moazami, A.Ya. Esbouei, H. Hatefnia.* Surface Treatment of Fiberboard Wood Pulp Mat with Dispersed Water (by the Example of Arian Sina MDF Company)..... 177
- N.V. Primakov, V.V. Tanyukevich.* Forestry Measures in Shelterbelts of the Krasnodar Territory..... 185
- M.A. Zyryanov, S.O. Medvedev, A.P. Mokhirev.* Increasing the Resource Potential of Wood Raw Materials..... 193
-



Научная статья

УДК 630:575.21:582.475(470.57)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-9-25

Фенотипическая оценка клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесостепной зоне Башкирского Предуралья

В.Ф. Коновалов[✉], *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>

А.А. Габитова, *канд. биол. наук, доц.*; *ResearcherID: [JXX-2216-2024](https://orcid.org/0000-0003-2310-805X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2310-805X>

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

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

Д.А. Рафикова, *ассистент*; *ResearcherID: [HKV-8568-2023](https://orcid.org/0000-0003-1074-4671)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1074-4671>

Э.Р. Ханова, *канд. с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: [G-4662-2018](https://orcid.org/0000-0001-5399-2232)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5399-2232>

Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, д. 34,
г. Уфа, Россия, 450001; vfkonov@bk.ru[✉], abigabi@yandex.ru, aliya201199@mail.ru,
din-ka5@mail.ru, elvira-nr@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.05.22 / Одобрена после рецензирования 29.08.22 / Принята к печати 01.09.22

Аннотация. Проведена оценка основных морфометрических признаков рамет клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в сравнительном аспекте. Вегетативное потомство плюсовых деревьев вида представлено в составе клоновой плантации, созданной в 2005 г. в Дюртюлинском лесничестве лесостепной зоны Республики Башкортостан на участке с типом лесорастительных условий С₂. Обеспечено соблюдение селекционно-генетического принципа фенотипической оценки внутри- и межгруппового различия клонов и рамет сосны обыкновенной, а также методических и методологических требований к проведению полевого этапа исследования. Учтены таксационные показатели: высота и диаметр ствола, диаметр и протяженность кроны, приросты осевого побега по высоте – у 100 клонов при сплошном перече. Выявлен различный характер распределения средних значений анализируемых показателей стволов у вегетативных потомств плюсовых деревьев. Лучший рост по диаметру ствола (25,5±0,73 см), высоте (11,2±0,16 м), приросту осевого побега (0,45±0,02 м) свойствен потомству клонов плюсового дерева 29/17. Высокую селекционную ценность представляют клоны 263/40, 264/41, 262/39 с таксационными показателями выше средних для всей совокупности деревьев в архиве клонов, что указывает на специфику генотипов этих экземпляров. Определены уровни существенности различий и интенсивности отбора лучших клонов плюсовых деревьев по морфометрическим признакам, что свидетельствует о различном характере индиви-

© Коновалов В.Ф., Габитова А.А., Габделхаков А.К., Рафикова Д.А., Ханова Э.Р., 2024

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

дуальной неидентичности каждого из плюсовых деревьев относительно остальных изученных. Выявленные в архиве клонов ценные генотипы потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной могут быть рекомендованы для дальнейшего использования в лесном селекционном семеноводстве при создании высокопродуктивных и устойчивых искусственных насаждений данного ценного древесного вида в регионе.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, плюсовое дерево, архив клонов, раметы, рост сосны обыкновенной, диаметр ствола, высота ствола, диаметр кроны, протяженность кроны, прирост осевого побега

Для цитирования: Коновалов В.Ф., Габитова А.А., Габделхаков А.К., Рафикова Д.А., Ханова Э.Р. Фенотипическая оценка клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесостепной зоне Башкирского Предуралья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 9–25. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-9-25>

Original article

Phenotypic Assessment of Clones of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Plus Trees in the Forest-Steppe Zone of the Bashkir Cis-Urals

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

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

Aigul A. Gabitova, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [JXX-2216-2024](https://orcid.org/0000-0003-2310-805X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2310-805X>

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>

Dina A. Rafikova, Assistant; ResearcherID: [HKY-8568-2023](https://orcid.org/0000-0003-1074-4671),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1074-4671>

El'vira R. Khanova, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-4662-2018](https://orcid.org/0000-0001-5399-2232),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5399-2232>

Bashkir State Agrarian University, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34, Ufa, 450001, Russian Federation; vfkonovalov@bk.ru[✉], abigabi@yandex.ru, aliya201199@mail.ru, din-ka5@mail.ru, elvira-nr@yandex.ru

Received on May 4, 2022 / Approved after reviewing on August 29, 2022 / Accepted on September 1, 2022

Abstract. An assessment of the main morphometric features of the ramets of clones of Scots pine plus trees in a comparative aspect has been carried out. The vegetative progeny of plus trees of the species are represented as part of a clonal plantation created in 2005 in the Dyurtyulinskiy forestry of the forest-steppe zone of the Republic of Bashkortostan in an area with the C₂ type of forest growing conditions. Compliance with the breeding and genetic principle of phenotypic assessment of intra- and intergroup differences in Scots pine clones and ramets, as well as methodical and methodological requirements for conducting the field stage of the study, has been ensured. Taxation indicators (the height and diameter of the stem, the diameter and length of the crown, the increment of the central shoot in height) have been taken into account for 100 clones at a continuous count. A varying nature of the distribution of the average values of the analyzed stem indicators in the vegetative progeny of plus trees has been revealed. The best growth in stem diameter (25.5±0.73 cm) and height (11.2±0.16 m), as well



as central shoot increment (0.45 ± 0.02 m), are typical for the progeny of clones of the plus tree 29/17. Clones 263/40, 264/41, 262/39 with taxation indicators above the average for the entire set of trees in the clone archive are of high breeding value, which indicates the specificity of the genotypes of these specimens. The levels of significance of the differences and the intensity of selection of the best clones of plus trees based on morphometric features have been determined, which indicates the different nature of the individual non-identity of each of the plus trees relative to the rest of the trees studied. The valuable genotypes of the progeny of Scots pine plus trees identified in the clone archive can be recommended for further use in forest seed breeding when creating highly productive and sustainable artificial plantations of this valuable tree species in the region.

Keywords: Scots pine, plus tree, clone archive, ramets, Scots pine growth, stem diameter, stem height, crown diameter, crown length, central shoot increment

For citation: Konovalov V.F., Gabitova A.A., Gabelkhakov A.K., Rafikova D.A., Khanova E.R. Phenotypic Assessment of Clones of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Plus Trees in the Forest-Steppe Zone of the Bashkir Cis-Urals. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 9–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-9-25>

Введение

Одной из важных проблем лесного хозяйства является воспроизводство лесных ресурсов с использованием хозяйственно ценных древесных видов при повышении продуктивности древостоев. В соответствии со статьей 61 Лесного кодекса Российской Федерации, вырубленные и погибшие лесные насаждения подлежат воспроизводству, которое осуществляется путем лесного селекционного семеноводства, лесовосстановления и ухода за лесами. Создание искусственных насаждений ориентировано в основном на 2 направления: быстрое получение качественной деловой древесины за счет сокращения оборота рубки древостоев посредством внедрения инновационных технологий в лесокультурное производство; создание высокопродуктивных и устойчивых лесных культур селекционно ценным посадочным материалом, характеризующихся высоким уровнем генетического разнообразия [40, 41]. Для успешной реализации данных направлений важно обратить внимание на современные приемы плюсовой селекции древесных видов [25, 26], эффективную организацию их селекционного семеноводства [6, 9, 10, 16, 24, 45], научно обоснованное использование ценного генофонда естественных насаждений при воспроизводстве лесов [13, 32, 33, 35, 43].

В настоящее время в поле зрения отечественных и зарубежных ученых находятся оценка генетического потенциала растений [38, 39], их фенотипического и генотипического полиморфизма в популяциях [15], взаимосвязи роста, состояния и сохранности древесных видов с уровнем их генетического статуса [3, 12, 36, 42, 44, 47], селекционно-генетический анализ лесосеменных объектов [27, 28, 30, 31], использование молекулярных маркеров для идентификации, инвентаризации и характеристики генетического разнообразия лесных ресурсов [7, 20, 21, 29, 37, 46] в селекции и семеноводстве лесных растений [5, 18, 19], поэтапная паспортизация и генотипирование деревьев на лесосеменных плантациях [14]. Исследования с опорой на генетические маркеры позволяют более объективно устанавливать уровень отбора растений с ценными признаками в насаждениях и лесных питомниках [34]. В практику оценки

качества и эффективности лесосеменных объектов широко внедряются методы многомерной статистики и факторного анализа для ранней диагностики лучших растений по комплексу морфометрических признаков и дальнейшего использования этих растений в лесном семеноводстве [1, 2, 8]. Перевод семеноводства на генетико-селекционную основу является одной из главных задач современного лесного хозяйства [1, 9, 11, 22]. Отмечается чрезвычайно низкая доля заготавливаемых лесных семян с хорошими наследственными свойствами, что нашло отражение в распоряжении Правительства РФ от 26.09.2013 № 1724-р «Об утверждении Основ государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года». Поэтому важным вопросом для ученых-лесоводов и практиков становится разработка способов повышения эффективности существующих и вновь закладываемых лесосеменных плантаций, архивов клонов, постоянных лесосеменных участков с целью увеличения объемов производства семян с улучшенными наследственными свойствами [10].

Значительное количество научных работ (ссылки на них приведены выше) посвящено ценному в хозяйственном отношении древесному виду – сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). В нашем исследовании этому виду, составляющему наиболее важные лесосеменные объекты в Республике Башкортостан, уделено первостепенное внимание. Сосна обыкновенная является одним из основных древесных видов-лесообразователей в нашей стране. Ее ареал охватывает обширную территорию всей лесной зоны Европы, Западной и Центральной Сибири. В Республике Башкортостан сосняки составляют 68,8 % от всей площади лесов и 77,1 % от их запаса. Сосна обыкновенная ежегодно широко вводится в лесокультурное производство. Доля искусственных насаждений данного вида в воспроизводстве лесов в республике составляет более 60 %. Сосна обыкновенная является очень полиморфной. По форме кроны и ствола выделена 31 форма, по строению корки – 9, по размерам и окраске хвои – 21, по окраске стробилов и строению шишек – 12, по качеству древесины – 3 и по цвету семян – 5 [23]. Приведенная классификация форм сосны обыкновенной не является исчерпывающей.

Каждый древостой вида представлен множеством деревьев, среди которых выделяются лучшие по комплексу хозяйственно ценных признаков и свойств – плюсовые деревья. По данным учета 2018 г., их количество в Республике Башкортостан составляет 586 шт. (Лесной план Республики Башкортостан: утв. указом Главы Республики Башкортостан от 27 дек. 2018 г. № УГ-340). Плюсовые деревья являются базой создания ценных селекционно-семеноводческих объектов: лесосеменных плантаций, архивов клонов, маточных плантаций, испытательных культур и постоянных лесосеменных участков. В селекционном семеноводстве наиболее ценными являются архивы клонов, созданные прививками черенками с плюсовых деревьев. В республике архивы клонов занимают площадь 14,2 га, в т. ч. на 13,2 га произрастает сосна обыкновенная.

На современном этапе развития лесного семеноводства необходимо обратить пристальное внимание на оценку эффективности лесосеменных объектов путем их качественного изучения в морфометрическом и генетическом аспектах. В настоящее время объекты лесного семеноводства Республики Башкортостан не обеспечивают воспроизводство лесов семенами с ценными наслед-

ственными свойствами. Доля улучшенных семян не превышает 4 % в общем объеме ежегодной заготовки лесных семян. Для оценки селекционной эффективности архивов клонов требуется натурное обследование данных объектов, по результатам которого должно быть принято решение об их использовании для заготовки семян улучшенной селекционной категории. При этом важно учитывать рост, урожайность и качество потомств плюсовых деревьев сосны обыкновенной в архивах клонов.

Цель исследования заключалась в фенотипической оценке закономерностей роста потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной в архиве клонов для установления его селекционно-генетического статуса как ценного лесосеменного объекта.

Задачи исследования – проанализировать особенности роста рамет клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной, характера наследования хозяйственно ценных признаков в вегетативном потомстве и на основе полученных результатов оценить качество этих клонов и возможность их использования для заготовки семян улучшенной селекционной категории.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся архив клонов сосны обыкновенной, заложенный в 2005 г. в Ангасякском участковом лесничестве Дюртюлинского лесничества лесостепной зоны Башкирского Предуралья. Географические координаты объекта исследования – 5°36'13,68" с. ш. 54°49'49,82" в. д. Архив клонов создан посадкой сеянцев с привитыми черенками, заготовленными с плюсовых деревьев сосны обыкновенной. Привитые 2-летние сеянцы были высажены на подготовленном участке по схеме 5×5 м, тип лесорастительных условий – С₂, почвы – серые лесные супесчаные на суглинистой подпочве, размещение клонов – рядовое. В архиве клонов представлено потомство от 10 плюсовых деревьев сосны обыкновенной с количеством рамет в каждом клоне 40. У рамет клонов оценивались основные морфометрические признаки: высота и диаметр ствола, диаметр кроны в ряду и между рядами, ее протяженность, прирост осевого побега за последний год. Для каждого клона рассчитывался комплексный оценочный показатель (КОП) по отношению среднего диаметра ствола к средней площади его поперечного сечения. Для диаметра и высоты ствола, диаметра и протяженности кроны устанавливался коэффициент наследуемости с использованием величин варьирования признаков, полученных на основе однофакторного дисперсионного анализа. Для оценки внутри- и межклоновой изменчивости изучаемых признаков применялся факторный анализ. Опытные данные подвергались статистической обработке в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями [4, 17].

Результаты исследования и их обсуждение

Клоновая лесосеменная плантация сосны обыкновенной как объект нашего исследования закладывалась в 2005 г. сеянцами с привитыми черенками от плюсовых деревьев данного вида. Площадь плантации – 1 га. Параметры материнских плюсовых деревьев приведены в табл. 1.

Таблица 1
Сведения о материнских плюсовых деревьях сосны обыкновенной
The data on the Scots pine mother plus trees

Номер дерева	Лесничество	Тип леса	Характеристика дерева					Год аттестации
			Возраст, лет	Высота, м	Диаметр ствола, см	Превышение*, %		
						по высоте	по диаметру	
29/17	Ангарское	Брусничный	145	39	44	112	133	1969
107/32			117	36	40	108	128	1978
106/31			117	36	40	108	128	
135/35			147	39	44	112	133	
136/36			147	39	44	112	133	
137/37	Дюртюлинское	Разнотравный	147	39	44	112	133	
263/40	Ангарское	Брусничный	141	37	42	109	129	1979
264/41			141	37	43	109	130	
262/39	Дюртюлинское	Разнотравный	112	32	39	106	118	
484/69			143	38	42	110	130	1982

*По отношению ко всей совокупности деревьев в насаждении.

Все отобранные деревья характеризовались хорошим очищением стволов от сучьев, прямоствольностью, полнодревесностью, а также отсутствием дефектов и пороков формы стволов. Преобладающими являлись брусничные и разнотравные типы леса. Возраст плюсовых деревьев составлял 112–145 лет, высота стволов – 32–39 м, их диаметр – 39–44 см. По сравнению со средними параметрами линейного и радиального роста стволов для всей совокупности деревьев в насаждениях превышение высоты варьировало в пределах от 106 до 112 %, диаметра ствола – от 118 до 133 %. Сохранность 10 клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной на момент нашего учета составила 87,5 %. На данном объекте с замерами рамет по каждому клону проведена оценка основных морфометрических признаков стволов и кроны деревьев сосны обыкновенной в возрасте 19 лет (табл. 2).

Таблица 2
Статистические показатели клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной
The statistical indicators of clones of Scots pine plus trees

Признак	M	min	max	Δlim	$\pm m$	$C_v, \%$	P, %	t^*
Диаметр ствола, см	21,7	17,5	25,3	7,8	0,72	10,7	3,3	2,54
Высота, м	10,1	8,6	11,3	2,7	0,29	9,3	2,9	0,24
Диаметр кроны, м	5,9	5,0	8,4	3,4	0,25	14,8	4,2	2,83
Протяженность кроны, м	8,3	6,6	9,5	2,9	0,32	10,9	3,8	0,06
Прирост осевого побега, м	0,39	0,32	0,49	0,17	0,02	15,3	5,1	0,50
КОП, см/см ²	2,84	2,0	4,4	2,4	0,14	23,0	4,9	2,58

Примечание: M – среднее арифметическое значение; max – абсолютный максимум значений; min – абсолютный минимум значений; Δlim – диапазон абсолютных значений; $\pm m$ – ошибка репрезентативности среднего; C_v – коэффициент вариации (изменчивости), %; P – точность опыта, %; t^* – опытное значение критерия Стьюдента ($t_{05} = 1,98$; $t_{01} = 2,62$).

Для всей совокупности деревьев в архиве клонов средний диаметр ствола составил $21,7 \pm 0,72$ см с коэффициентом изменчивости признака 10,7 % и его варьированием от 17,5 до 25,3 см. Средняя высота стволов клонов, с варьированием признака от 8,6 до 11,3 м, соответствует $10,1 \pm 0,29$ м при коэффициенте изменчивости 9,3 %. Размеры кроны, наряду с диаметром и высотой стволов, являются критериальными показателями при отборе плюсовых деревьев сосны обыкновенной в насаждениях. В связи с этим нами было уделено особое внимание изучению размеров кроны. Средний диаметр кроны как средневзвешенное значение замеров в ряду – $5,90 \pm 0,21$ м и между рядами – $5,82 \pm 0,29$ м составил $5,9 \pm 0,25$ м с минимальным и максимальным значениями признака 5,0 и 8,4 м соответственно и коэффициентом вариации 14,8 %. Протяженность кроны с минимальным и максимальным значениями 6,6 и 9,5 м соответственно в среднем составила $8,3 \pm 0,32$ м при изменчивости 10,9 %. Прирост годичного осевого побега у клонов был незначительным – $0,39 \pm 0,02$ м со средней изменчивостью 15,3 % и варьированием от 0,32 до 0,49 м. Достоверная связь по сравнению со средними значениями оцениваемых признаков для всего насаждения установлена по диаметру стволов – 2,54, среднему диаметру кроны – 2,83 и КОП – 2,58. Выявлено наличие в кронах рамет сосны обыкновенной отмерших и поврежденных при сборе шишек побегов. Жизненное состояние рамет оценивается как здоровое в 100 % случаев, крона деревьев хорошо развита (90 %), искривленность стволов не отмечена. Проведена статистическая оценка морфометрических признаков клонов сосны обыкновенной с замерами ствола и кроны и охватом репрезентативного массива рамет в каждом клоне (табл. 3).

Таблица 3

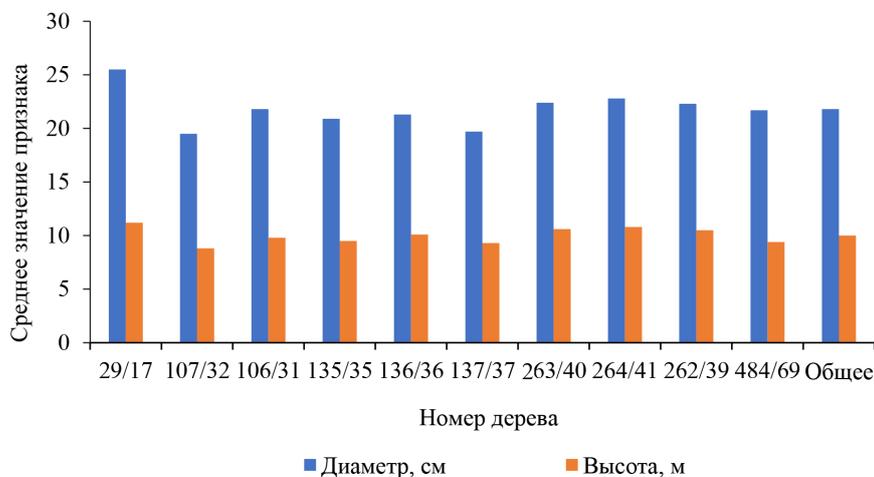
Средние (с ошибкой) таксационные показатели клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной
The average (erroneous) taxation indicators of Scots pine plus tree clones

Номер дерева	Диаметр ствола, см	Высота, м	Диаметр кроны, м	Протяженность кроны, м	Прирост осевого побега, м	КОП, см/см ²
29/17	$25,5 \pm 0,73$	$11,2 \pm 0,16$	$7,1 \pm 0,22$	$10,5 \pm 0,27$	$0,45 \pm 0,02$	$2,25 \pm 0,11$
107/32	$19,5 \pm 0,42$	$8,8 \pm 0,25$	$6,5 \pm 0,31$	$7,5 \pm 0,19$	$0,42 \pm 0,02$	$2,96 \pm 0,07$
106/31	$21,8 \pm 0,74$	$9,8 \pm 0,26$	$6,9 \pm 0,24$	$8,3 \pm 0,23$	$0,40 \pm 0,02$	$2,71 \pm 0,12$
135/35	$20,9 \pm 0,70$	$9,5 \pm 0,34$	$6,7 \pm 0,38$	$7,6 \pm 0,30$	$0,41 \pm 0,02$	$2,81 \pm 0,13$
136/36	$21,3 \pm 0,73$	$10,1 \pm 0,18$	$6,8 \pm 0,22$	$8,0 \pm 0,30$	$0,39 \pm 0,02$	$2,89 \pm 0,09$
137/37	$19,7 \pm 0,55$	$9,3 \pm 0,30$	$6,2 \pm 0,38$	$7,3 \pm 0,27$	$0,37 \pm 0,02$	$3,82 \pm 0,19$
263/40	$22,4 \pm 0,31$	$10,6 \pm 0,21$	$7,2 \pm 0,35$	$8,1 \pm 0,19$	$0,35 \pm 0,02$	$2,55 \pm 0,11$
264/41	$22,8 \pm 0,77$	$10,8 \pm 0,21$	$7,4 \pm 0,23$	$8,3 \pm 0,24$	$0,41 \pm 0,02$	$2,87 \pm 0,14$
262/39	$22,3 \pm 0,46$	$10,5 \pm 0,30$	$7,5 \pm 0,45$	$8,2 \pm 0,37$	$0,44 \pm 0,02$	$2,72 \pm 0,12$
484/69	$21,7 \pm 0,86$	$9,4 \pm 0,28$	$6,4 \pm 0,28$	$7,9 \pm 0,21$	$0,40 \pm 0,01$	$2,82 \pm 0,13$

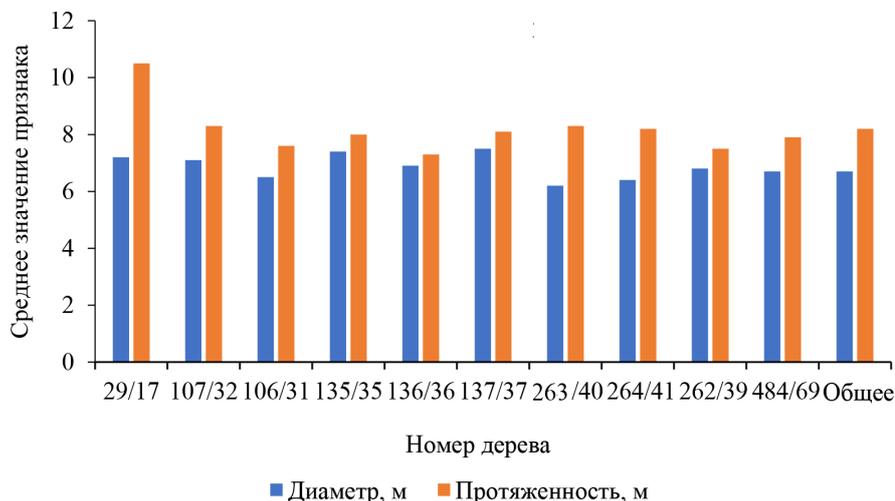
Вегетативное потомство плюсовых деревьев сосны обыкновенной, введенное в состав обследуемого архива клонов, в основном не демонстрирует выраженной фенотипической однородности по комплексу оцениваемых признаков. Однако следует отметить, что нами выделено 4 клона – 29/17, 263/40, 264/41 и 262/39 – с диаметром ствола от 22,3 до 25,5 см, это превышает среднее для совокупности рамет клонов сосны обыкновенной – $21,7 \pm 0,72$ см. Данные клоны характеризуются большими высотой стволов – от $10,5 \pm 0,30$ до $11,2 \pm 0,16$ м; диаметром кроны – от $7,1 \pm 0,22$ до $7,5 \pm 0,45$ м; ее протяженностью – от

8,2±0,37 до 10,5±0,27 м; приростом осевого побега ствола – от 0,44±0,02 до 0,45±0,02 м. Их количество составляет 40 % от общего числа учтенных клонов. КОП клонов имеют достаточно близкие цифровые значения. Доля низкорослых клонов (107/32, 137/37) с диаметром стволов до 20 см составила 20 % от всей выборки рамет в клонах. Диаметр стволов других клонов – 106/31, 136/36, 135/35 и 484/69 – от 20,9±0,70 до 21,8±0,74 см (табл. 3).

Проведенное исследование позволяет выделить 3 группы клонов по значению оцениваемых признаков: выше среднего (29/17, 264/41, 263/40 и 262/39), со средним (135/35, 136/36, 264/41, 484/69), с низким (107/32, 137/37). Фенотипическая изменчивость диаметра, высоты стволов и размеров кроны клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной наглядно отражена на рисунке.



a



b

Изменчивость клонов сосны обыкновенной на объекте исследования по размерам:
a – ствола; *b* – кроны

The variability of Scots pine clones at the research object in terms of: *a* – stem size;
b – crown size

Как было отмечено выше, на объекте исследования не выявлено убедительного фенотипического различия анализируемых морфометрических признаков стволов как между плюсовыми деревьями, так и между представителями их клонового потомства. Тем не менее следует выделить клоны 29/17, 263/40, 264/41 и 262/39 как лучшие по росту и развитию кроны, отвечающие предъявляемым требованиям и пригодные для заготовки семян высокой селекционной ценности. Средние морфометрические признаки данных клонов наиболее значимо превышают обобщенные значения признаков для всей совокупности деревьев на объекте: диаметр ствола – $21,9 \pm 0,73$ см, высота – $10,0 \pm 0,29$ м, диаметр кроны – $6,9 \pm 0,30$ м, ее протяженность – $8,3 \pm 0,31$ м.

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что в архиве клонов сосны обыкновенной представленность рамет соответствует схеме их размещения на участке, обеспечивающей успешный рост, семеношение и развитие деревьев вида.

Однако оценка рамет по комплексу основных морфометрических признаков не позволяет точно идентифицировать их селекционную значимость, что свидетельствует о необходимости генетической подеревной оценки клонового потомства.

Объективно охарактеризовать масштабы различий в оценках клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной по комплексу морфометрических признаков и выявить степень влияния на них специфики генетического потенциала растений и среды их произрастания позволил однофакторный дисперсионный анализ (табл. 4).

Таблица 4

Существенность различий и интенсивность отбора клонов сосны обыкновенной по морфометрическим признакам деревьев
The significance of the differences and the intensity of Scots pine clone selection according to the morphometric features of the trees

Признак	$F_{\text{оп}}$	Оценка влияния фактора						R	I
		по Н.А. Плохинскому			по Д.У. Снедекору				
		h^2	$\pm sh^2$	F_h^2	h^2	$\pm sh^2$	F_h^2		
1	2,135	0,1750	0,0825	2,121	0,1561	0,0805	1,939	3,69	0,39
2	2,145	0,1761	0,0823	2,140	0,1598	0,0840	1,902	3,45	0,86
3	2,968	0,2288	0,0722	2,966	0,1804	0,0819	2,207	4,84	0,46
4	0,691	0,0646	0,0935	0,691	0,0501	0,0949	0,528	0,16	0,43
5	1,388	0,1220	0,0878	1,389	0,0937	0,0906	1,034	3,48	0,33

Примечание: 1 – диаметр ствола, см; 2 – высота ствола, м; 3 – диаметр кроны, м; 4 – протяженность кроны, м; 5 – прирост осевого побега, м.

$F_{\text{оп}}$ – опытное значение критерия Фишера; h^2 – доля влияния организованного фактора; $\pm sh^2$ – ошибка доли влияния организованного фактора; F_h^2 – критерий Фишера в оценке достоверности доли влияния организованного фактора; R – наследуемый селекционный дифференциал, %; I – интенсивность отбора.

Данные дисперсионного анализа показывают превышение соответствующих табличных значений для заданного числа степеней свободы на 5%-м ($F_{05} = 1,9$) и 1%-м ($F_{01} = 2,5$) уровнях значимости по ряду основных признаков – диаметру ($F_{\text{оп}} = 2,135$) и высоте ($F_{\text{оп}} = 2,145$) ствола, диаметру кроны ($F_{\text{оп}} = 2,968$). По протяженности кроны ($F_{\text{оп}} = 0,691$) и приросту осевого побега ($F_{\text{оп}} = 1,388$) различия между клонами являются недостоверными. Подобное

заключение дало возможность вычисления оценок влияния организованного фактора (различия между клонами) на формирование общего фона фенотипической изменчивости клонов по параметрам ствола и кроны.

В расчетах по алгоритму Н.А. Плохинского доля влияния клоновой принадлежности на оцениваемые морфометрические признаки составляет от 6,9 до 22,9 %. Сопоставимыми и достоверно различающимися оказались оценки диаметра – $h^2 \pm sh^2 = 0,1750 \pm 0,0825$, высоты ствола – $h^2 \pm sh^2 = 0,1761 \pm 0,0823$ и диаметра кроны – $h^2 \pm sh^2 = 0,2288 \pm 0,0772$.

По алгоритму Д.У. Снедекора, с несколько меньшим расчетным критерием Фишера – $F_h^2 = 0,528 - 2,207$, установлено аналогичное достоверное различие между клонами по диаметру и высоте ствола, диаметру кроны, что согласуется с критерием Фишера на 5%-м уровне значимости ($F_{05} = 1,9$). Однофакторный дисперсионный анализ позволил определить наследуемый селекционный дифференциал (генетическое улучшение) и показатель интенсивности отбора как отношение селекционного дифференциала к популяционной величине среднего квадратического отклонения признака. При однократном отборе клонов сосны обыкновенной по анализируемым признакам генетическое улучшение незначительно – от 0,16 до 4,84 % при интенсивности отбора $I = 0,33 - 0,86$. Полученные данные в целом свидетельствуют о положительном селекционном эффекте в отношении диаметра и высоты ствола, диаметра кроны при проведении отбора потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной по фенотипу. Селекционное улучшение по названным признакам на 3,69–4,84 % следует считать не столь значительным, но представляющим практический интерес.

Проведен регрессионный анализ по комплексу изучаемых признаков клонов сосны обыкновенной, задачей которого являлась оценка связей между количественными переменными этих признаков (табл. 5). Форма корреляционной связи диаметра стволов клонов с другими их морфометрическими признаками выражена уравнением множественной линейной регрессии: $Y = -29,193 - 0,392X_1 + 3,538X_2 + 73,981X_3$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,711$ свидетельствует о том, что связь варьирования диаметра стволов и остальных изучаемых признаков клонов, описываемая линейной зависимостью, достаточно высокая.

Таблица 5

Регрессионный анализ взаимосвязи морфометрических признаков клонов сосны обыкновенной ($R^2 = 0,711$)
The regression analysis of the relationship between the morphometric features of Scots pine clones ($R^2 = 0,711$)

Признак	$b_1 \pm \text{ошибка}$	$b_2 \pm \text{ошибка}$	t	p
Диаметр ствола, см	—	$-29,193 \pm 13,453$	-2,170	0,073
Высота, м	$-0,848 \pm 0,354$	$-0,392 \pm 0,163$	-2,398	0,053
Диаметр кроны, м	$1,299^* \pm 0,370^*$	$73,981^* \pm 21,083^*$	3,509*	0,012
Прирост осевого побега, м	$0,898^* \pm 0,279^*$	$3,538^* \pm 1,102^*$	3,209*	0,018

Примечание: b_1, b_2 – коэффициенты регрессии по диаметру ствола и другим признакам соответственно; p – уровень значимости. *Различия достоверны при $p < 0,05$.

На уровне значимости $p < 0,05$ клоны достоверно различаются по присутствию осевого побега ствола и диаметру кроны. Для установления тесноты линейной связи между основными признаками ствола и кроны клонов сосны обыкновенной проведен корреляционный анализ (табл. 6).

Таблица 6

**Оценка тесноты связи морфометрических признаков
клонов сосны обыкновенной**

**Assessment of the closeness of the relationship between the morphometric features
of Scots pine clones**

Показатель	Признак 1	Признак 2	Признак 3	Признак 4	Признак 5	Признак 6
<i>Признак 1</i>						
r	1,000	0,856	0,559	0,858	0,070	-0,783
$\pm m_r$	0	0,089	0,156	0,088	0,231	0,101
t_r	0	9,617	3,583	9,750	0,303	7,752
<i>Признак 2</i>						
r	0,856	1,000	0,335	0,749	0,015	-0,427
$\pm m_r$	0,089	0	0,192	0,118	0,234	0,178
t_r	9,617	0	1,744	6,347	0,064	2,399
<i>Признак 3</i>						
r	0,559	0,335	1,000	0,191	0,092	-0,788
$\pm m_r$	0,156	0,192	0	0,212	0,224	0,108
t_r	3,583	1,744	0	0,901	0,411	7,296
<i>Признак 4</i>						
r	0,858	0,749	0,191	1,000	0,047	-0,476
$\pm m_r$	0,088	0,118	0,212	0	0,230	0,171
t_r	9,750	6,347	0,901	0	0,204	2,784
<i>Признак 5</i>						
r	0,070	0,015	0,092	0,047	1,000	-0,247
$\pm m_r$	0,231	0,234	0,224	0,230	0	0,204
t_r	7,752	0,064	0,411	0,204	0	1,211
<i>Признак 6</i>						
r	-0,783	-0,427	-0,788	-0,476	-0,247	1,000
$\pm m_r$	0,101	0,178	0,108	0,171	0,204	0
t_r	7,752	2,399	7,296	2,784	1,211	0

Примечание: r – коэффициент корреляции Пирсона; $\pm m_r$ – ошибка коэффициента корреляции; t_r – статистическая значимость коэффициента корреляции (критические – $r_{05} = 0,44$ и $r_{01} = 0,56$); 6 – КОП.

В расчетах нами использован коэффициент корреляции с вычислением его ошибки и статистической значимости. Для оценки тесноты связи между изучаемыми признаками применена шкала Р.Э. Чеддока. Очень высокие парные корреляционные связи установлены между диаметром и высотой ствола – $r = 0,856 \pm 0,089$, диаметром кроны и ее протяженностью – $r = 0,858 \pm 0,088$, протяженностью кроны и высотой ствола – $r = 0,749 \pm 0,118$. Отмечена высокая отрицательная корреляционная связь между диаметром ствола и КОП –

$r = -0,783 \pm 0,101$, диаметром кроны и КОП – $r = -0,788 \pm 0,108$, умеренная связь между диаметром ствола и диаметром кроны – $r = -0,559 \pm 0,156$, отрицательная – между протяженностью кроны и КОП – $r = -0,476 \pm 0,171$. Слабыми являются связи диаметра ствола и протяженности кроны – $r = -0,191 \pm 0,212$, диаметра ствола и годового прироста осевого побега – $r = 0,15 \pm 0,35$, КОП и годового прироста осевого побега – $r = -0,247 \pm 0,204$. Проведенный корреляционный анализ позволяет выбрать морфометрические признаки ствола и кроны с высокими коэффициентами корреляции и использовать их в качестве диагностических при отборе лучших рамет клонов сосны обыкновенной для получения в дальнейшем семян высокой селекционной ценности.

Заключение

Клоны сосны обыкновенной от плюсовых деревьев вида, анализируемые по комплексу значимых в селекции признаков ствола и кроны, характеризуются различными числовыми значениями признаков, что служит подтверждением влияния генетических факторов на рост и развитие рамет, произрастающих в идентичных благоприятных лесорастительных условиях. Выделены клоны вида со статистически достоверно более высокими диаметром и высотой ствола, размерами кроны и годовым приростом осевого побега. Эти клоны в селекционном отношении представляют наивысшую ценность. Отличительные особенности таксационных показателей клонов сосны обыкновенной, подтвержденные дисперсионным, корреляционным и регрессионным анализом, в большинстве случаев соответствуют достоверному уровню существенности различий, что указывает на специфику генотипов клонов. Сходство между собой клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной по параметрам ствола и кроны достаточно индивидуализировано как в разрезе их совокупности на клоновой плантации, так и в отношении отдельных рамет. Применение методов многомерной статистики и SSR-анализа плюсовых деревьев сосны обыкновенной в подобных исследованиях в перспективе позволит разработать более аргументированные и достоверные диагностические критерии с целью качественной оценки клонов вида и сделать наиболее убедительное заключение об их селекционно-генетической пригодности для заготовки семян улучшенной селекционной категории. Негативными факторами являются отсутствие своевременных лесоводственных уходов за насаждениями на данном селекционном объекте и повреждение кроны отдельных деревьев в процессе заготовки шишек. Специалистам лесного хозяйства необходимо обращать внимание на эти факторы с целью сохранения высокого селекционного статуса архива клонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Эффективность отбора плюсовых деревьев: моногр. Н. Новгород: Нижегородская СХА, 2016. 464 с.
Besschetnova N.N. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). Reproductive Potential of Plus Trees: Monograph. Nizhniy Novgorod, Nizhniy Novgorod State Agriculture Academy Publ., 2016. 464 p. (In Russ.).
2. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Горелов А.Н., Михалюк А.В. Рост клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной на лесосеменной плантации во Владимирской области // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 2. С. 18–32.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Gorelov A.N., Mikhailyuk A.V. Growth of Clones of Plus Trees of Scots Pine on the Seed Orchard in the Vladimir Region. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2022, no. 2, pp. 18–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.2.18>

3. Бондаренко А.С. Взаимосвязь сохранности растений с уровнем генетического разнообразия по основным количественным признакам в насаждениях сосны обыкновенной и ели европейской // Тр. СПбНИИЛХ. 2019. № 3. С. 38–50.

Bondarenko A.S. The Relationship between the Scots Pine and Norway Spruce Plants Safety and the Genetic Diversity Level on Main Quantitative Characteristics. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2019, no. 3, pp. 38–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2019.3.38>

4. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований. СПб.: Политехн. ун-т, 2016. 125 с.

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. *Statistic Processing of Forestry Research Materials*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2016. 125 p. (In Russ.).

5. Буторина А.К., Машкина О.С., Камалова И.И. Использование молекулярных маркеров в генетике, селекции и семеноводстве лесных древесных растений // Лесные культуры, селекция древесных пород на юге Русской равнины: материалы межрегион. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения доц. Еньковой Елизаветы Ивановны. Воронеж: ВГЛТА, 2007. С. 10–35.

Butorina A.K., Mashkina O.S., Kamalova I.I. The Use of Molecular Marker in Genetics, Selection and Seed Production of Forest Woody Plants. *Forest Crops, Tree Species Breeding in the South of the Russian Plain: Materials of the Interregional Conference, Dedicated to the 95th Anniversary of Associate Professor En'kova Elizaveta Ivanovna*. Voronezh, Voronezh State Academy of Forestry and Technologies Publ., 2007, pp. 10–35. (In Russ.).

6. Видякин А.И. Эффективность плюсовой селекции древесных растений // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. XXVII, № 1–2. С. 18–24.

Vidyakin A.I. Efficiency of Plus Selection of Trees. *Khvoynye borealnoi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. XXVII, no. 1–2, pp. 18–24. (In Russ.).

7. Гостимский С.А., Кокаева З.Г., Коновалов Ф.А. Изучение организации и изменчивости генома растений с помощью молекулярных маркеров // Генетика. 2005. Т. 41, № 4. С. 480–492.

Gostimskiy S.A., Kokaeva Z.G., Kononov F.A. Studying Plant Genome Variation Using Molecular Markers. *Genetika* = Russian Journal of Genetics, 2005, vol. 41, iss. 4, pp. 378–388. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11177-005-0101-1>

8. Ефимов В.М., Тараканов В.В., Роговцев Р.В. Применение методов многомерной статистики для ранней диагностики лучших по росту популяций сосны в географических культурах // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. XXVII, № 1–2. С. 58–62.

Efimov V.M., Tarakanov V.V., Rogovtsev R.V. Application of Multivariate Statistics Methods for Early Diagnostics of Fast-Growing Populations in Pine Provenance Trials. *Khvoynye borealnoi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. XXVII, no. 1–2, pp. 58–62. (In Russ.).

9. Ефимов Ю.П. Генетико-селекционная оценка объектов постоянной лесосеменной базы // Генетика и селекция – на службе лесу: материалы междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: НИИЛГиС, 1997. С. 298–307.

Efimov Yu.P. Genetic and Breeding Assessment of Permanent Forest Seed Base Objects. *Genetics and Breeding – at the Service of the Forest: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Voronezh, Research Institute of Forest Genetics Publ., 1997, pp. 298–307. (In Russ.).

10. Ефимов Ю.П. Современные проблемы и перспективы улучшения лесов селекционно-генетическими методами // Лесохоз. информ. 2008. № 3–4. С. 30–32.
- Efimov Yu.P. Current Problems and Prospects for Improving Forests Using Selection and Genetic Methods. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2008, no. 3–4, pp. 30–32. (In Russ.).
11. Ефимов Ю.П. Семенные плантации в селекции и семеноводстве сосны обыкновенной. Воронеж: Истоки, 2010. 253 с.
- Efimov Yu.P. *Seed Plantations in Breeding and Seed Production of Scots Pine*. Voronezh, Istoki Publ., 2010. 253 p. (In Russ.).
12. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Сравнительная оценка генетического разнообразия естественных популяций и клоновых плантаций сосны обыкновенной и ели финской в Карелии // Экол. генетика. 2015. Т. XIII, № 4. С. 55–67.
- Ilinov A.A., Raevsky B.V. Genetic Diversity Comparative Evaluation of *Pinus sylvestris* L. and *Picea × Fennica* (Regel) Kom. Native Populations and Clonal Seed Orchards in Russian Karelia. *Ekologicheskaya genetika* = Ecological Genetics, 2015, vol. XIII, no. 4, pp. 55–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/ecogen13455-67>
13. Ирошников А.И. Генетические факторы устойчивости и продуктивности лесных биоценозов // Продуктивность и стабильность лесных экосистем: тез. докл. Междунар. симп. Красноярск: Ин-т леса и древесины, 1982. С. 28–29.
- Iroshnikov A.I. Genetic Factors of Stability and Productivity of Forest Biocenoses. *Productivity and Stability of Forest Ecosystems: Abstracts of the Reports of the International Symposium*. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood, 1982, pp. 28–29. (In Russ.).
14. Кальченко Л.И., Тараканов В.В. Поэтапная паспортизация деревьев на клоновых плантациях сосны обыкновенной: использование метода фенетики // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. XXVII, № 1–2. С. 87–90.
- Kalchenko L.I., Tarakanov V.V. Gradual Passportisation of Trees in Pine Clone Orchards: Using the Methods of Phenetics. *Khvoynye borealnoi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. XXVII, no. 1–2, pp. 87–90. (In Russ.).
15. Коршиков И.И., Демкович А.Е. Генетический полиморфизм клонов и их семенного потомства в архивно-клоновой плантации плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Цитология и генетика. 2010. Т. 44, № 1. С. 36–45.
- Korshikov I.I., Demkovich A.E. Genetic Polymorphism of Clones and Their Seed Progeny in the Scotch Pine Clone Plantation. *Cytology and Genetics*, 2010, vol. 44, no. 1, pp. 36–45 (In Russ.).
16. Кострикин В.А., Беспаленко О.Н., Котельников Д.С., Порываев М.В. Опыт создания архива клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Моршанском лесничестве Тамбовской области // Экологические и биологические основы повышения продуктивности и устойчивости природных и искусственно возобновленных лесных экосистем: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию высш. лесн. образования в г. Воронеже и ЦЧР России. Воронеж, 2018. Т. 1. С. 542–550.
- Kostrikin V.A., Bepalenko O.N., Kotel'nikov D.S., Poryvaev M.V. Experience in Creating an Archive of Clones of Scots Pine Plus Trees in the Morshanskiy Forestry of the Tambov Region. *Ecological and Biological Basis for Increasing the Productivity and Sustainability of Natural and Artificially Regenerated Forest Ecosystems: Materials of the International Scientific and Practical Conference, Dedicated to the 100th Anniversary of Higher Forestry Education in Voronezh and Central-Chernozem Economic Region*. Voronezh, 2018, vol. 1, pp. 542–550. (In Russ.).
17. Лакин Г.Ф. Биометрия. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1980. 293 с.
- Lakin G.F. *Biometry*. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 293 p. (In Russ.).

18. Милутина Т.Н., Шейкина О.В., Новиков П.С. Молекулярно-генетические исследования изменчивости клонов плюсовых деревьев *Pinus sylvestris* по ISSR-маркерам // Хвойные бореал. зоны. 2013. Т. XXXI, № 1–2. С. 102–105.

Milutina T.N., Sheikina O.V., Novikov P.S. Molecular Genetic Studies of the Variability of *Pinus sylvestris* Plus Tree Clones Using ISSR Markers. *Khvoynye borealnoi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2013, vol. XXXI, no. 1–2, pp. 102–105. (In Russ.).

19. Новиков П.С., Шейкина О.В., Милутина Т.Н. Изменчивость плюсовых деревьев сосны обыкновенной на архиве клонов по ISSR-маркерам // Вестн. Марийск. гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 82–87.

Novikov P.S., Sheikina O.V., Milutina T.N. Variation of *Pinus sylvestris* Plus Trees on the Clone Archive in Accordance with ISSR Markers. *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Vestnik of the Mari State University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2011, no. 3, pp. 82–87. (In Russ.).

20. Падутов В.Е. Генетические и биотехнологические основы рационального использования лесных генетических ресурсов Беларуси // Лесохоз. информ. 2008. № 3–4. С. 23–24.

Padutov V.E. Genetic and Biotechnological Foundations for the Rational Use of Forest Genetic Resources in Belarus. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2008, no. 3–4, pp. 23–24. (In Russ.).

21. Политов Д.В. Применение молекулярных маркеров в лесном хозяйстве для идентификации, инвентаризации и оценки генетического разнообразия лесных ресурсов // Лесохоз. информ. 2008. № 3–4. С. 24–27.

Politov D.V. Application of Molecular Markers in Forestry for Identification, Inventory and Assessment of Genetic Diversity of Forest Resources. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2008, no. 3–4, pp. 24–27. (In Russ.).

22. Потылев В.Г. Проблемы лесного селекционного семеноводства // Лесохоз. информ. 1997. № 3. С. 14–30.

Potylev V.G. Problems of Forest Breeding Seed Production. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry Information*, 1997, no. 3, pp. 14–30. (In Russ.).

23. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 191 с.

Pravdin L.F. *Scots Pine. Variation, Intraspecific Taxonomy and Selection*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 191 p. (In Russ.).

24. Семериков Л.Ф., Исаков Ю.Н., Тараканов В.В., Семериков В.Л., Глотов Н.В. О генетико-селекционном аспекте сохранения и улучшения лесов России (окончание) // Лесохоз. информ. 1998. № 10. С. 29–40.

Semerikov L.F., Isakov Yu.N., Tarakanov V.V., Semerikov V.L., Glotov N.V. On the Genetic and Selection Aspect of the Conservation and Improvement of Russian Forests (End). *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry Information*, 1998, no. 10, pp. 29–40. (In Russ.).

25. Царев А.П. Программы лесной селекции в России и за рубежом: моногр. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2013. 164 с.

Tsarev A.P. *Forest Breeding Programs in Russia and Abroad: Monograph*. Moscow, MSFU Publ., 2013. 164 p. (In Russ.).

26. Царев А.П., Лаур Н.В. Вопросы и проблемы плюсовой селекции // Лесн. вестн. 2006. № 5. С. 118–123.

Tsarev A.P., Laur N.V. Issues and Problems of Plus Selection. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2006, no. 5, pp. 118–123. (In Russ.).

27. Шейкина О.В., Гладков Ю.Ф. Обоснование показателей генетического разнообразия для лесосеменных плантаций сосны обыкновенной в Республике Марий Эл // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2016. № 4(60). С. 73–76.

Sheikina O.V., Gladkov Yu.F. Substantiation of Indicators of Genetic Viability of Forest-Seed Plantations of Scotch Pine in the Republic of Mary El. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University, 2016, no. 4(60), pp. 73–76. (In Russ.).

28. Шейкина О.В., Лебедева Э.П., Шигапов З.Х. Фенотипическая и генетическая изменчивость клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной на лесосеменной плантации в Чувашской Республике: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2013. 160 с.

Sheikina O.V., Lebedeva E.P., Shigapov Z.Kh. *Phenotypic and Genetic Variability of Clones of Plus Trees of Scotch Pine on a Forest Seed Plantation in the Chuvash Republic*: Monograph. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2013. 160 p. (In Russ.).

29. Шейкина О.В., Романов Е.М. SSR-анализ плюсовых деревьев сосны обыкновенной из Республики Марий Эл // Лесохоз. информ. 2023. № 2. С. 91–101.

Sheikina O.V., Romanov E.M. SSR-Analysis of *Pinus sylvestris* Plus Trees from Mari El Republic. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2023, no. 2, pp. 91–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.07>

30. Шигапов З.Х. Сравнительный генетический анализ лесосеменных плантаций и природных популяций сосны обыкновенной // Лесоведение. 1995. № 3. С. 19–24.

Shigapov Z.Kh. Comparative Genetic Analysis of Forest Seed Plantations and Natural Populations of Scots Pine. *Lesovedenie* = Russian Forest Sciences, 1995, no. 3, pp. 19–24. (In Russ.).

31. Шигапов З.Х., Тимерьянов А.Ш., Янбаев Ю.А., Шигапова А.И. Динамика генетической структуры потомства по годам на лесосеменной плантации и в природной популяции сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. // Генетика. 1996. Т. 32, № 10. С. 1363–1370.

Shigapov Z.Kh., Timer'yanov A.Sh., Yanbaev Yu.A., Shigapova A.I. The Dynamics of the Genetic Structure of Offspring by Year on a Forest Seed Plantation and in the Natural Population of Scots Pine *Pinus sylvestris* L. *Genetika* = Russian Journal of Genetics, 1996, vol. 32, no. 10, pp. 1363–1370 (In Russ.).

32. Andersson B., Elfving B., Persson T., Ericsson T., Kroon J. Characteristics and Development of Improved *Pinus sylvestris* in Northern Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, vol. 37, no. 1, pp. 84–92. <https://doi.org/10.1139/x06-224>

33. Androsiuk P., Zielinski R., Polok K. B-SAP Markers Derived from the Bacterial KatG Gene Differentiate Populations of *Pinus sylvestris* and Provide New Insights into Their Postglacial History. *Silva Fennica*, 2011, vol. 45, no. 1, art. no. 29. <https://doi.org/10.14214/sf.29>

34. Ackzell L. A Comparison of Planting, Sowing and Natural Regeneration for *Pinus sylvestris* (L.) in Boreal Sweden. *Forest Ecology and Management*, 1993, vol. 61, iss. 3–4, pp. 229–245. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90204-Z](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90204-Z)

35. Eding H., Crooijmans R.P.M.A., Groenen M.A.M., Meuwissen T.H.E. Assessing the Contribution of Breeds to Genetic Diversity in Conservation Schemes. *Genetics Selection Evolution*, 2002, vol. 34, art. no. 613. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-34-5-613>

36. Feng F.-J., Wang F.-Y., Liu T. The Influence Factors of the ISSR-PCR Experiment System on *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. *Chinese Bulletin of Botany*, 2004, vol. 21, iss. 3, pp. 326–331.

37. Feng F.-J., Han S.-J., Wang H.-M. Genetic Diversity and Genetic Differentiation of Natural *Pinus koraiensis* Population. *Journal of Forestry Research*, 2006, vol. 17, pp. 21–24. <https://doi.org/10.1007/s11676-006-0005-5>

38. Gömöry D., Bruchánik R., Paule L. Effective Population Number Estimation of Three Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Orchards Based on an Integrated Assessment of Flowering, Floral Phenology, and Seed Orchard Design. *Forest Genetics*, 2000, vol. 7, iss. 1, pp. 65–75.

39. Gömöry D., Bruchánik R., Longauer R. Fertility Variation and Flowering Asynchrony in *Pinus sylvestris*: Consequences for the Genetic Structure in Seed Orchards. *Forest Ecology and Management*, 2003, vol. 174, iss. 1–3, pp. 117–126. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00031-2)
40. Haapanen M., Hynynen J., Ruotsalainen S., Siipilehto J., Kilpeläinen M.-L. Realized and Projected Gains in Growth, Quality and Simulated Yield of Genetically Improved Scots Pine in Southern Finland. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 997–1009. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0989-0>
41. Haapanen M., Ruotsalainen S. Adaptive Performance of Genetically Improved and Unimproved Seedlings of Scots Pine. *Silva Fennica*, 2021, vol. 55, no. 5, art. no. 10534. <https://doi.org/10.14214/sf.10534>
42. Huili W., Shuxue Y., Li G., Hailong L., Wei L. Genetic Diversity Assessment and Fingerprint Construction of Superior Tree Populations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Journal of GANSU Agricultural University*, 2022, vol. 57, iss. 3, art. no. 057. <https://doi.org/10.13432/j.cnki.jgsau.2022.03.013>
43. Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The Genetic and Economic Gains from Forest Tree Breeding Programmes in Scandinavia and Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32, iss. 4, pp. 273–286. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1242770>
44. Ivetić V., Devetaković J., Nonić M., Stanković D., Šijačić-Nikolić M. Genetic Diversity and Forest Reproductive Material – from Seed Source Selection to Planting. *iForest-Biogeosciences Forestry*, 2016, vol. 9, iss. 5, pp. 801–812. <https://doi.org/10.3832/ifor1577-009>
45. Kroon J. *Spatiotemporal Patterns of Genetic Variation for Growth and Fertility in Scots Pine*. Doctoral Thesis. Umeå, Swedish University of Agricultural Sciences, 2011. 59 p.
46. Li L., Lejing L., Zhiyong Z., Bo L., Jie R. Construction of SSR Fingerprint and Genetic Diversity Analysis of 93 Maple Germplasm Resources. *Molecular Plant Breeding*, 2022, vol. 20, iss. 4, pp. 1250–1263. <https://doi.org/10.13271/j.mpb.020.001250>
47. Wasielewska M., Klemm M., Burczyk J. Genetic Diversity and Mating System of Scots Pine Plus Trees. *Dendrobiology*, 2005, vol. 53, pp. 57–62.

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*56:630*18
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-26-36

Ресурсный потенциал бархата амурского в Приамурско-Приморском хвойно-широколиственном районе

Н.В. Выводцев, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6614-8468>
Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136, г. Хабаровск,
Россия, 680035; Nikolai@pnu.edu.ru

Поступила в редакцию 23.03.22 / Одобрена после рецензирования 18.06.22 / Принята к печати 22.06.22

Аннотация. Кедрово-широколиственные леса на Дальнем Востоке занимают площадь чуть больше 3 млн га. Бархат амурский (*Phellodendron amurense*) – один из ярких представителей древесной флоры кедрово-широколиственных лесов. В прошлом столетии для него были разработаны объемные и сортиментные таблицы. Таблиц хода роста для этой породы нет. В целях повышения точности лесотаксационных работ в настоящей статье по материалам государственной инвентаризации разработаны таблицы хода роста для указанного вида. Экспериментальным материалом послужили 159 модельных деревьев с постоянных пробных площадей, заложенных в насаждениях разных типов леса и классов бонитета при проведении государственной инвентаризации лесов. При изучении закономерностей роста бархата амурского использовали 2 подхода. В первом случае при выравнивании таксационных показателей в качестве независимой переменной принят диаметр деревьев, во втором – их возраст. Первый вариант таблицы хода роста близок к разрядной шкале объемов, во втором случае – соответствует общепринятой форме таблиц хода роста. В обоих вариантах рассчитана общая древесная продуктивность, а также объем коры и пробки. Число стволов найдено через постоянную изреживания. В насаждениях бархат амурский встречается одиночными экземплярами, редко произрастает группами до 10 деревьев. В анализируемой выборке максимальный возраст бархата – 100 лет, высота – 25 м, диаметр ствола – 60 см. Разработанные таблицы хода роста отражают закономерности развития бархата амурского Приамурско-Приморского хвойно-широколиственного района. Первая таблица хода роста составлена по ступеням толщины, вторая – по классам возраста. В сравнении с дубом (по данным таблиц хода роста) бархат амурский показал более высокий потенциал прироста по запасу на 1 дерево. Составленные таблицы можно использовать для расчета запасов древесины бархата амурского в составе смешанного древостоя, объемов и массы пробки, размера ущерба при повреждении насаждений рубками или пожарами, других целей. Высокий темп роста деревьев бархата в молодом возрасте указывает на перспективность этой породы при лесоразведении.

Ключевые слова: бархат амурский, постоянная изреживания, продуктивность, таблица хода роста, объем коры, масса пробки, Дальний Восток

Благодарности: Автор признателен магистранту Кравчук О.Р. за предоставленные архивные данные по Амурской области.

Для цитирования: Выводцев Н.В. Ресурсный потенциал бархата амурского в Приамурско-Приморском хвойно-широколиственном районе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 26–36. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-26-36>

Original article

The Resource Potential of the Amur Cork Tree in the Priamur-Primorskiy Coniferous-Broadleaved Area

Nikolai V. Vyvodtsev, Doctor of Agriculture, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6614-8468>

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation; Nikolai@pnu.edu.ru

Received on March 23, 2022 / Approved after reviewing on June 18, 2022 / Accepted on June 22, 2022

Abstract. Cedar-broad-leaved forests in the Far East cover an area of slightly more than 3 million hectares. Amur cork tree (*Phellodendron amurense*) is one of the brightest representatives of the woody flora of cedar-broad-leaved forests. In the last century, volumetric and assortment tables were developed for it. There are no growth progress tables for this species. In order to increase the accuracy of forest taxation work, in this article, based on the materials of the state inventory, tables of growth progress for this species have been developed. The experimental material has been 159 model trees from permanent sample plots laid in plantations of different forest types and quality classes during the state forest inventory. When studying the growth patterns of the Amur cork tree, two approaches have been used. In the first case, when leveling taxation indicators, the diameter of the trees has been taken as an independent variable, and in the second – their age. The first version of the growth progress table is close to the digit scale of volumes, in the second case it corresponds to the generally accepted form of growth progress tables. In both versions, the total wood productivity, as well as the volume of bark and cork, has been calculated. The number of trunks has been found through the thinning constant. In plantations, the Amur cork tree occurs in single specimens, rarely growing in groups of up to 10 trees. In the analyzed sample, the maximum age of the Amur cork trees has been 100 years, the height – 25 m and the diameter – 60 cm. The developed growth progress tables reflect the patterns of development of the Amur cork trees growing in the Priamur-Primorskiy coniferous-broad-leaved area. The first growth progress table has been compiled by diameter classes, the second – by age classes. In comparison with oak, according to the growth progress tables, the Amur cork tree has shown a higher increment potential in terms of stock per one tree. The compiled tables can be used to calculate the reserves of the Amur cork tree wood as part of a mixed stand, the cork volume and mass, the amount of damage to plantations caused by logging or fires, and for other purposes. The high growth rate of the Amur cork tree at a young age indicates the prospects of this species for afforestation.

Keywords: Amur cork tree, thinning constant, productivity, growth rate table, bark volume, cork mass, the Far East

Acknowledgements: The author is grateful to undergraduate student O.R. Kravchuk for providing the archival materials on the Amur Region.

For citation: Vyvodtsev N.V. The Resource Potential of the Amur Cork Tree in the Priamur-Primorskiy Coniferous-Broadleaved Area. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 26–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-26-36>

Введение

При интенсификации лесного хозяйства использование лесов должно быть направлено на улучшение их породного состава, возрастной структуры, качественных параметров. Решение этих вопросов невозможно без знания закономерностей роста и строения естественных и искусственных насаждений [21–24].

Бархат амурский (*Phellodendron amurense* Rupr.) из семейства рутовых (Rutaceae Juss.) – древнейший представитель третичной флоры, ценный дикорастущий пробконос и медонос [1, 6, 10, 11, 14, 15, 17, 19]. Вид распространен в Амурской области [8, 17–20], Приамурском и Хабаровском краях, на Сахалине [17, 19].

Бархат амурский растет как отдельными экземплярами, так и небольшими группами. В поймах рек совместно с вязом и ясенем маньчжурским может образовывать низкополнотные насаждения, больше соответствующие редине [16, 20]. Вид очень избирателен к почвенным условиям, имеет хорошо развитую, мощную корневую систему, но ее малейшее повреждение приводит к усыханию деревьев. На юге ареала на богатых, хорошо дренированных наносных почвах бархат амурский достигает 25 м в высоту, 60 см и более по диаметру на высоте 1,3 м. Растение двудомное, листопадное [17, 19]. Крона компактная, ажурная. В листьях, соцветьях и плодах содержатся эфирные масла [15]. Препараты, изготовленные из бархата амурского, обладают ценными лечебными свойствами: жаропонижающими, тонизирующими и антисептическими [5, 15].

Древесина на поперечном разрезе четко разделена по цвету на ядро и заболонь. Заболонь узкая, светло-желтая, ядро желтовато-золотистое, иногда светло-коричневое. Годичные кольца хорошо выражены, округлые просветы поздней древесины видны на поперечных и продольных распилах [17, 19]. Кора состоит из ярко-желтого луба и пробки до 7 см толщиной. Пробка эластичная, мягкая, глубоко растрескивающаяся, буровато-серая [7, 18]. За счет толстого слоя пробки в нижней части ствола бархат защищен от обгорания при беглых низовых пожарах. Выделяют 3 типа пробки: пластинчатокорую, ромбовидную и ясенекорую [7, 18, 20]. Наиболее ценной в хозяйственном отношении признана пластинчатокорая; она дает пробку I–II сорта [11]. В период активного освоения кедрово-широколиственных лесов Дальнего Востока (середина XX столетия) при заготовке древесины вели промышленную заготовку пробки бархата амурского [2–4, 9, 10, 19, 22, 24]. При этом заготовка больше соответствовала комплексному освоению лесов. Нормативы для сопровождения этого технологического процесса отсутствовали.

Надо отметить, что пробковая промышленность дореволюционной России при наличии в стране огромных запасов этого сырья базировалась на импортной пробке. Основными поставщиками были Франция (51 %), Португалия (22 %) [19], Алжир и Тунис. За период с 1923 по 1933 г. пробкового сырья завезено на сумму 11 463 тыс. р.

Пробка находила широкое применение в разных отраслях отечественной промышленности: судостроении, производстве холодильных установок, подводных приборов, авиационных и автомобильных моторов, шлемов, протезировании, изготовлении линолеума, выпуске винной продукции и многих др.

Но зависимость от импортного сырья не отвечала задачам интенсификации отечественной промышленности. Встал вопрос о создании в СССР собственной пробковой сырьевой базы. В течение 1924–1926 гг. государственные структуры, связанные с лесным хозяйством, занялись изучением возможности использования пробки бархата амурского в промышленных целях. С 1933 г. началась активная заготовка этого отечественного сырья. В 1941 г. было освоено производство экспанзита (изоляционные плиты без клеящих веществ) на одесском заводе «Большевик».

С 1945 г. кора бархата амурского перерабатывалась на Хабаровском экспанзитовом заводе, который прекратил свое существование в 60-е гг. прошлого столетия, несмотря на то, что продукция из пробки становилась все более востребованной во многих отраслях, и в первую очередь в строительстве и пищевой промышленности [19].

В настоящее время информация о российском пробковом дереве больше касается его целебных свойств, медопродуктивности, интродукции, экологии лесных экосистем [5, 11, 12, 15]. Вопрос хозяйственного использования бархата амурского в Дальневосточном регионе на повестке дня не стоит. Вид занесен в Красную книгу Амурской области [8], но это выглядит как защитная мера от его несанкционированного использования для других задач. Цель настоящей статьи – изучить региональные закономерности увеличения с возрастом основных таксационных показателей бархата амурского и разработать таблицу хода увеличения с возрастом для этой ценной древесной породы.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись леса Приамурско-Приморского хвойно-широколиственного района. Для определения количественных и качественных показателей насаждений при проведении государственной инвентаризации лесов было заложено 1816 постоянных пробных площадей (ППП). По субъектам Федерации они распределились следующим образом: Приморский край – 947 шт., Хабаровский край – 674 шт., Еврейская автономная область – 195 шт. В этот перечень не включены ППП в государственных природных заповедниках, расположенных на территории Приамурско-Приморского хвойно-широколиственного района, а также ППП в Сахалинской области. Полевые работы в рамках государственной инвентаризации лесов проводились с июня по сентябрь, т. е. насаждения были в облиственном состоянии и вероятность ошибки при определении видового разнообразия исключалась. Из названных ППП для определения морфометрических показателей бархата амурского было отобрано 117 шт. Средняя формула состава насаждений на ППП с произрастанием бархата амурского имеет 20 % дуба монгольского. На другие породы – березу ребристую, осину, березу плосколистную, липу, ясень маньчжурский, вяз, клен мелколистный – приходится до 10 %. Единично встречаются площадки, где в древостой входят кедр, ель, пихта, вяз, ива и другие породы. Насаждения с бархатом амурским – типичные, неоднократно пройденные выборочными рубками разной интенсивности хвойно-широколиственные древостои с участием сосны корейской.

Для исследования возрастных изменений таксационных показателей отобрано 159 деревьев бархата амурского (табл. 1). Сухостойные деревья (6,5 %) из анализа исключены.

Таблица 1

Распределение стволов бархата амурского по диаметру в Приамурско-Приморском хвойно-широколиственном районе
The distribution of the trunks of the Amur cork trees in the Priamur-Primorsky coniferous-broad-leaved area by diameter

Показатель	Степень толщины, см												
	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60
Число стволов, шт.	13	19	23	39	21	16	9	7	5	3	2	1	1
Средняя высота, м	11	12	14	18	19	21	22	23	23	22	24	26	26
Возраст, лет	28	37	54	74	80	83	90	105	110	106	110	110	110

Для расчета объемов стволов бархата амурского в коре и без коры использовали уравнения регрессии [14]:

$$V_{\text{в.к.}} = 7,8 \cdot 10^{-5} dh + 341 \cdot 10^{-7} d^2 h; \quad (1)$$

$$V_{\text{б.к.}} = 2,2 \cdot 10^{-5} dh + 279 \cdot 10^{-7} d^2 h,$$

где $V_{\text{в.к.}}$, $V_{\text{б.к.}}$ – объем ствола в коре и без коры соответственно, м³; d – диаметр ствола, см; h – высота ступени, м.

Возрастные изменения высот и диаметров находили с помощью дробно-рационального уравнения:

$$(a + bA)/(1 + cA + dA^2), \quad (2)$$

где A – возраст деревьев, лет; a , b , c , d – параметры уравнения (для высоты $a = -1,222526E + 002$; $b = 1,4957E + 001$; $c = 5,16065E - 001$; $d = -1,63351E - 004$; для диаметра $a = -1,88968416772E + 002$; $b = 1,63361252508E + 001$; $c = 5,61358760077E - 001$; $d = -7,72553143182E - 004$).

Ключевым показателем в расчетах полноты и запаса является число стволов господствующей части насаждения. Чаще всего его рассчитывают по известной в таксации формуле:

$$N = \frac{4G}{\pi d^2},$$

где N – число стволов господствующей части насаждения, шт.; G – сумма площадей поперечных сечений, м²; d – средний диаметр насаждения, см.

В одновозрастных нормальных насаждениях изреживание стволов осуществляется по параболической кривой [13]:

$$C = Nd^x, \quad (3)$$

где C – постоянная величина, см ^{x} .

Определенная по таблицам хода роста хвойных и лиственных пород степень x равна 3/2. В этом случае выражение d^x можно представить в виде формулы

$$d^x = d^{3/2} = d\sqrt{d},$$

а формулу (3) как

$$C = Nd\sqrt{d}, \quad (4)$$

или

$$N = \frac{C}{d\sqrt{d}}. \quad (5)$$

В нормальных насаждениях хвойных и лиственных пород постоянная изреживания варьирует от 72,4 до 110,4 тыс. [2–4, 24]. Эти цифры говорят о том, что на 1 дерево в насаждении приходится от 7 до 11 м² площади.

Постоянная изреживания C отражает следующую закономерность: в полных нормальных насаждениях произведение числа стволов и среднего диаметра является постоянной величиной, обусловленной биологическими особенностями породы, и не зависит от возраста насаждения и условий местопроизрастания (класса бонитета) [13].

Формула (3) и ее модификации (4) и (5) были положены в основу таблиц хода роста бархата амурского. Учитывая, что бархат амурский является представителем кедрово-широколиственных лесов, постоянная C рассчитана по данным таблиц хода роста С.Н. Моисеенко [2, 4, 24] с использованием уравнения (4) относительно данных для сосны корейской. Среднее значение C в интервале 110–320 лет оказалось равным 61 тыс. [2]. Бархат амурский в составе насаждений встречается эпизодически, поэтому в формулу (3) ввели поправочный коэффициент 0,1. В этом случае количество деревьев бархата амурского в насаждениях, относящихся к ступени толщины 12 см, следующее:

$$N = \frac{0,1C}{d\sqrt{d}} = \frac{6100}{41,57} = 147 \text{ шт./га.}$$

Средняя высота в ступенях толщины определена графическим способом через анализ выборки по высоте и диаметру (табл. 1).

В разрядной шкале, составленной для бархата амурского, различия объемов стволов 1-го и 5-го разрядов, относящихся к одной ступени толщины, рассчитанной по формуле (1), составляют 30 %. Средний объем коры для ступени 12 см на 24 % больше, чем для ступени 60 см. Доля пробки для ступени 12 см составляет 17 %, а для ступени 60 см – 15 %. Несмотря на незначительные расхождения объемов коры и пробки, эти показатели не усреднялись, а рассчитывались для каждой ступени толщины по справочным данным.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчета по приведенным формулам основных таксационных показателей сведены в таблицы продуктивности (табл. 2) и хода роста (табл. 3). Таблица продуктивности имеет нестандартный вид. Независимой переменной является 4-сантиметровая ступень толщины. Таблица построена по типу разрядной шкалы с принятием за начало отсчета ступени 12 см и названа таблицей продуктивности по причине отсутствия указания на возраст.

Таблица 2

Таблица продуктивности бархата амурского
The Amur cork tree productivity table

D	$d\sqrt{d}$	H	N	M_n	V_k	$V_{пр}$	$M_{пр}$	$\Delta_{ср.пр}$	Отпад			Продуктивность		
									N_o	V_o	ΣV_o	$W_{общ}$	$\Delta_{ср}$	$\Delta_{тек}$
12	41,57	9,3	147	9,5	2,53	1,64	230	19	–	–	–	9,5	0,79	–
16	64,00	12,6	96	11,9	2,93	1,93	308	19	51	5,1	5,1	17,0	1,06	1,88
20	89,44	15,4	68	15,1	3,53	2,37	415	21	28	5,3	10,4	25,5	1,28	2,12
24	117,60	17,6	48	18,5	4,18	2,85	470	20	20	6,0	16,4	34,9	1,45	2,35
28	148,20	19,3	41	21,7	4,77	3,30	549	20	17	7,7	24,1	45,8	1,64	2,72
32	181,00	20,7	34	24,5	5,27	3,70	605	19	7	4,4	28,5	53,0	1,66	1,81
36	216,00	21,6	28	26,3	5,58	3,95	627	17	6	4,9	33,4	59,7	1,66	1,68
40	253,00	22,4	24	28,3	5,91	4,24	701	17	4	5,2	38,6	64,9	1,67	1,30
44	291,80	23,0	21	30,4	6,26	4,56	701	16	3	4,8	43,4	73,8	1,68	2,22
48	332,50	23,6	18	32,6	6,65	4,89	709	15	3	4,9	48,3	80,9	1,68	1,78
52	375,00	24,0	16	34,9	7,05	5,23	736	14	2	4,0	52,3	87,2	1,68	1,58
56	419,10	24,3	15	38,4	7,68	5,76	696	12	1	2,4	54,7	93,1	1,66	1,48
60	464,80	24,5	14	51,0	10,15	7,65	658	11	1	2,7	57,4	108,4	1,80	3,82

Примечание: D – ступень толщины, см; H – средняя высота дерева, м; N – число деревьев, шт./га; M_n – запас, м³/га; V_k , $V_{пр}$ – объем коры и пробки соответственно, м³/га; $M_{пр}$ – масса пробки, кг/га; $\Delta_{ср.пр}$ – среднее изменение массы пробки, кг/га; N_o – число отпавших стволов, шт./га; V_o – объем отпавших стволов, м³/га; ΣV_o – сумма отпада, м³/га; $W_{общ}$ – общая продуктивность, м³/га; $\Delta_{ср}$ – средний текущий прирост, м³/га; $\Delta_{тек}$ – текущий прирост по запасу, м³/га.

Таблица продуктивности бархата амурского характеризует насаждения, соответствующие относительной полноте 0,1. Диаметры модельных деревьев бархата амурского варьируют от 12 до 60 см. В этом диапазоне средняя высота равна 9,3–24,5 м. Текущее изменение запаса максимально в ступени 60 см. Оно обусловлено не высокой численностью стволов, а их скачкообразным изреживанием в спелых насаждениях.

Масса пробки зависит от ступени толщины и количества относящихся к ней деревьев: чем больше диаметр ствола и количество деревьев с таким диаметром, тем больший объем пробки можно заготовить. Количественная спелость по объему пробки наступает при достижении деревьями ступени 32 см. Увеличение диаметра деревьев на 1 см сопровождается повышением массы пробки на 1,66 кг. Дальнейший рост по диаметру остается почти постоянным (1,67–1,80 кг). Стартовое число стволов в ступени 12 см, равное 147 шт., до финальной ступени (60 см) сократилось на 133 шт. (естественный отпад). Накопленная масса пробки на оставшихся 14 деревьях достигла 658 кг/га. Объем отпавших деревьев составил 57 м³/га, растущих – 51 м³/га. Общая продуктивность – 108 м³/га.

На том же экспериментальном материале проведен расчет таблицы хода роста, в которой за независимую переменную принят возраст (табл. 3). Средние высоты и диаметры определены по уравнению (2), количество стволов – по формуле (5), остальные показатели приведены по справочным данным [14].

Таблица 3

Таблица хода роста бархата амурского
The Amur cork tree growth progress table

A	H	D _{1,3}	N	G	F	M _н	Δ _{ср}	Δ _{тек}	Отпад			Продуктивность			M _{пр}
									N _о	V _о	ΣV _о	W _{общ}	Δ _{ср} "	Δ _{тек}	
20	9,2	12,6	137	1,70	0,605	9,5	0,47	–	–	–	–	9,5	0,47	–	670
30	11,7	15,0	105	1,86	0,547	11,9	0,40	0,24	32	3,6	3,6	15,4	0,51	0,60	579
40	14,6	18,3	78	2,05	0,504	15,1	0,38	0,32	27	5,2	8,8	23,9	0,60	0,85	546
50	17,0	22,4	58	2,27	0,480	18,5	0,37	0,34	20	6,6	15,4	33,9	0,68	1,00	525
60	19,1	27,3	43	2,51	0,464	22,2	0,37	0,37	15	7,7	23,1	45,3	0,75	1,14	519
70	20,9	33,3	32	2,77	0,453	26,2	0,37	0,40	11	9,1	32,2	58,3	0,83	1,31	589
80	22,4	40,7	24	3,06	0,445	30,5	0,38	0,43	8	10,7	42,9	73,3	0,92	1,50	600
90	23,7	49,7	17	3,38	0,438	35,2	0,39	0,47	6	12,3	55,1	90,3	1,00	1,70	1090
100	24,8	60,7	13	3,74	0,434	40,2	0,40	0,51	5	14,1	69,2	109,4	1,09	1,91	1034

Примечание: D_{1,3} – средний диаметр, см; G – сумма площадей сечений, м²/га; F – видовое число; Δ_{ср} – среднее изменение запаса, м³/га.

Динамика высот бархата амурского соответствует II классу бонитета по шкале М.М. Орлова. Табл. 2 и 3, по существу, характеризуют одну и ту же выборку. В табл. 2 независимой переменной является диаметр, а в табл. 3 – возраст. Текущее изменение запаса по табл. 3 максимально в возрасте 100 лет, т. е. годовой прирост для 13 деревьев составлял 0,51 м³/га. Сравнения с насаждениями дуба II класса бонитета семенного происхождения позволили установить, что при текущем изменении запаса в дубняках 2,6 м³/га разница между насаждением этого вида и древостоем бархата составила 2,1 м³/га, этот показатель обеспечен 404 стволами дуба. Коэффициент полезного действия насаждений дуба равен 0,006 м³/га (2,6/404), а бархата – 0,039 м³/га (0,51/13). Превышение – 15-кратное.

Количество отпавших в процессе естественного изреживания стволов бархата составило 124 шт., объем – 69 м³/га (69/124 = 0,55 м³/га). У дуба аналогичный показатель равен 0,034 м³/га (183/5032). Превышение объема отпада, приходящегося на 1 отпавший ствол, у бархата над дубом 6-кратное. Из этого сравнения можно сделать вывод, что в смешанных насаждениях бархат амурский показывает больший лесорастительный эффект по сравнению с дубом в чистых насаждениях. Высокая доля отпада указывает на негативную реакцию бархата амурского на меняющиеся условия произрастания в результате рубки пород, растущих совместно с ним.

Следует обратить внимание на средний прирост массы пробки, продуцируемой бархатом за 1 год. Если для представленного возрастного ряда рассчитать средний прирост пробки, то с 10 га в год будем получать до 150 кг/га ценной продукции, необходимой для строительства, пищевой промышленности и других отраслей.

Выводы

1. Бархат амурский – ценный представитель дальневосточной флоры. Первый цикл государственной инвентаризации лесов в Приамурско-Приморском хвойно-широколиственном районе зафиксировал насаждения

бархата на площади 84,0 тыс. га, запас – 8848,4 тыс. м³. Для определения возрастных изменений таксационных показателей древостоев впервые по модельным деревьям в 2 вариантах была разработана таблица хода роста для бархата амурского. Кроме данных для древесной части в таблице приведены данные для пробки. Они указали на достаточно высокий ресурсный потенциал насаждений бархата. Основой метода построения являлось изучение модельных деревьев с постоянных пробных площадей. Через модельное дерево передается характер внутриценотических взаимоотношений в насаждениях. Через регрессионные уравнения эти взаимоотношения представлены в виде таблиц хода роста.

2. Разработанный норматив позволяет определить возрастные периоды важных хозяйственных мероприятий, варьируя независимые переменные. Одна таблица позволяет проводить расчет продуктивности древесной породы по принципу разрядной шкалы, в зависимости от диаметра, другая – в традиционной форме – в зависимости от возраста. В нормальных одновозрастных насаждениях произведение числа стволов и среднего диаметра – величина слабо варьирующаяся, обусловленная в первую очередь биологическими свойствами древесной породы. На это следует обращать внимание при подборе древостоев одного естественного ряда развития.

3. Количественная спелость древостоев бархата амурского по объему пробки на растущих деревьях наблюдается в ступени 20 см. Этот диаметр соответствует возрасту 45 лет. Ежегодный средний прирост пробки для условных 10 га составляет 139 кг. Разработанные таблицы хода роста позволят повысить точность таксации в насаждениях с участием бархата амурского в лесах Приамурско-Приморского хвойно-широколиственного района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агеенко А.С., Васильев Н.Г., Глоба-Михайленко Д.А., Холявко В.С. Древесная флора Дальнего Востока. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 224 с.
Ageenko A.S., Vasil'ev N.G., Globa-Mikhaylenko D.A., Kholyavko V.S. *Arboreal Flora of the Far East*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 224 p. (In Russ.).
2. Выводцев Н.В. Общие закономерности роста насаждений сосны корейской // Лесохоз. информ. 2020. № 3. С. 81–88.
Vivodtsev N.V. General Growth Patterns of Korean Pine Plantations. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2020, no. 3, pp. 81–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.07>
3. Выводцев Н.В. Особенности роста пихты цельнолистной на юге Приморского края // Вестн. Бурят. гос. с.-х. акад. им. В.Р. Филиппова. 2023. № 4(73). С. 88–96.
Vyvdtsev N.V. Growth Features of the Needle Fir in the South of Primorski Krai. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyajstvennoy akademii im. V.P. Filippova* = Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, 2023, no. 4(73), pp. 88–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.73.4.011>
4. Выводцев Н.В., Выводцева А.Н., Рёсукэ Кобаяси. Сосна кедровая корейская в Хабаровском крае и перспективы ее восстановления: моногр. Хабаровск: ТОГУ, 2016. 206 с.
Vyvdtsev N.V., Vyvdtseva A.N., Resuke Kobayashi. *Korean Pine in the Khabarovsk Territory and the Prospects for its Restoration*: Monograph. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2016. 206 p. (In Russ.).

5. Зориков П.С. Основные лекарственные растения Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 2004. 129 с.
Zorikov P.S. *The Main Medicinal Plants of Primorsky Krai*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2004. 129 p. (In Russ.).
6. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: СО РАН, 2002. 707 с.
Koropachinskiy I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody Plants of the Asian Part of Russia*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2002. 707 p. (In Russ.).
7. Кравчук О.Р., Выводцев Н.В. Формовое разнообразие коры бархата амурского (лат. *Phellodendron amurense*) // Уч. заметки ТОГУ. 2017. Т. 8, № 3. С. 69–75.
Kravchuk O.R., Vyvodtsev N.V. Shaped Variety of Bark of the Amur Cork Tree (Lat. *Phellodendron amurense*). *Uchenye zametki TOGU = Scientific Notes PNU*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 69–75. (In Russ.).
8. Красная книга Амурской области. Благовещенск: БГПУ, 2009. 446 с.
The Red Book of the Amur Region. Blagoveshchensk, BSPU Publ., 2009. 446 p. (In Russ.).
9. Кудинов А.И. Дубово-кедровые леса Южного Приморья и их динамика: моногр. / Примор. гос. с.-х. акад. Уссурийск: ПГСХА, 2000. 182 с.
Kudinov A.I. *Oak-Cedar Forests of Southern Primorye and Their Dynamics: Monograph*. Ussuriysk, Primorsky State Agricultural Academy Publ., 2000. 182 p. (In Russ.).
10. Майорова Л.А., Петропавловский Б.С. Пихтово-еловые леса Приморского края (эколого-географический анализ). Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2017. 164 с.
Mayorova L.A., Petropavlovskiy B.S. *Fir-Spruce Forests of Primorsky Krai (Ecological and Geographical Analysis)*. Vladivostok, PGI FEB RAS Publ., 2017. 164 p. (In Russ.).
11. Нечаев А.А. Медоносный пробконос // Пчеловодство. 2015. № 7. С. 28–30.
Nechaev A.A. Honey Cork Bug. *Pchelovodstvo = Beekeeping*, 2015, no. 7, pp. 28–30. (In Russ.).
12. Овчаренко А.А. Анализ результатов интродукции *Phellodendron amurense* Rupr. в пойменную дубраву р. Ворона // Соврем. проблемы науки и образования. 2012. № 3. Ст. № 318. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6387> (дата обращения: 07.05.24).
Ovcharenko A.A. Analysis of the Results of the Introduction of *Phellodendron amurense* Rupr. in the River-Bank Oak-Woods R. the Vorona. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 3. (In Russ.).
13. Савинов Е.П. К вопросу о густоте леса // Лесн. хоз-во. 1978. № 11. С. 57–59.
Savinov E.P. On the Issue of Forest Density. *Lesnoe khozyajstvo*, 1978, no. 11, pp. 57–59. (In Russ.).
14. Справочник для таксации лесов Дальнего Востока / отв. сост. и науч. ред. В.Н. Корякин. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2010. 527 с.
Handbook for Forest Taxation of the Far East. Compiler-in-chief and science editor V.N. Koryakin. Khabarovsk, Far East Forestry Research Institute Publ., 2010. 527 p. (In Russ.).
15. Тагильцев Ю.Г., Выводцев Н.В., Колесникова Р.Д. Недревесные лесные ресурсы: пищевые, лекарственные, плодово-ягодные, технические. Хабаровск: ТОГУ, 2014. 127 с.
Tagil'tsev Yu.G., Vyvodtsev N.V., Kolesnikova R.D. Non-Timber Forest Resources: Food, Medicinal, Fruit and Berry, Technical. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2014. 127 p. (In Russ.).
16. Тютрин С.А., Черная О.Р., Кравчук И.А. Таксация бархата амурского в пойме реки Бурея // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: сб. докл. междунар. экол. семинара / под ред. проф. П.Б. Рябухина. Хабаровск: ТОГУ, 2014. С. 98–106.

Tyutrin S.A., Chernaya O.R., Kravchuk I.A. Taxation of Amur Cork Tree in the Floodplain of the Bureya River. *Philosophy of Modern Nature Management in the Amur River Basin*: Collection of Reports from the International Environmental Seminar. Ed. by prof. P.B. Ryabukhin. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2014, pp. 98–106. (In Russ.).

17. Усенко Н.В. Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока: справ. кн. / под общ. ред. С.Д. Шлотгауэр. 3-е изд., перераб. и доп. Хабаровск: Приамур. вед., 2009. 271 с.

Usenko N.V. *Trees, Shrubs and Lianas of the Far East*: Reference Book. Under the general editorship of S.D. Schlotgauer. 3rd ed., revised and enlarged. Khabarovsk, Priamurskie vedomosti Publ., 2009. 271 p. (In Russ.).

18. Формовое разнообразие коры бархата амурского / сост. С.Н. Моисеенко, А.Г. Емлевская. Хабаровск, 1958. 4 с.

The Shape Diversity of the the Amur Cork Tree Bark. Comp. by S.N. Moiseenko, A.G. Emlevskaya. Khabarovsk, 1958. 4 p. (In Russ.).

19. Цыmek А.А., Любарский Л.В., Емашев С.Д., Трегубов Г.А. Бархат амурский / М-во лесн. хоз-ва СССР, ДальНИИЛХ; под рук. канд. с.-х. наук А.А. Цымека. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 136 с.

Tsymek A.A., Lyubarsky L.V., Emashev S.D., Tregubov G.A. *Amur Cork Tree*. Ministry of Forestry of the USSR, Far East Forestry Research Institute. Under the direction of the candidate of agriculture A.A. Tsymek. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 136 p. (In Russ.).

20. Черная О.Р., Тютрин С.А. Лес из бархата амурского в районе п. Новоспасск Амурской области. Характеристика фитоценоза // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. Т. 1. Красноярск: СибГТУ, 2013. С. 30–33.

Chernaya O.R., Tyutrin S.A. The Amur Cork Tree Forest in the Area of Novospassk Settlement of the Amur Region. Characteristics of Phytocenosis. *Forestry and Chemical Complexes – Problems and Solutions*: Collection of Articles Based on the Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Vol. 1. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2013, pp. 30–33. (In Russ.).

21. Erfanifard Y., Stereńczak K. Intra- and Interspecific Interactions of Scots Pine and European Beech in Mixed Secondary Forests. *Acta Oecologica*, 2017, vol. 78, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2016.12.002>

22. Nedoluzhko V., Dobrynin A. Woody Flora on the Islands of Peter the Great Bay, Sea of Japan. *World Natural Forests and Their Role in Global Processes*: International Conference. Khabarovsk, 1999, pp. 88–89.

23. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Berlin, Springer, 2009. 664 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>

24. Vyvodtsev N.V. Forest Resource Potential of Cedar in the Far East. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 670, art. no. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/670/1/012015>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Original article

УДК 630

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-37-48

The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow)

Ekaterina B. Dyomina[✉], *Postgraduate Student*; ResearcherID: [HHZ-9292-2022](https://orcid.org/0000-0001-7590-3819),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7590-3819>

Vera A. Savchenkova, *Doctor of Agriculture, Prof.*; ResearcherID: [Y-3167-2019](https://orcid.org/0000-0001-8593-7887),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8593-7887>

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; demina1292@yandex.ru[✉], v9651658826@yandex.ru

Received on December 26, 2022 / Approved after reviewing on April 23, 2023 / Accepted on April 26, 2023

Abstract. The ecological condition of urban plantations is an urgent problem of our time. The condition of plantations and soils characterizes the ecological and sanitary condition of the environment. In the structure of the cities, urban and forest parks are of particular importance. They mainly perform recreational functions, contributing to improving the health and well-being of city residents. Woody plants, due to their properties to absorb harmful substances that come with air pollution from industrial enterprises and motor vehicles, are one of the main mechanisms for stabilizing the environmental situation in cities. Technogenic pollutants, a significant proportion of which are heavy metals, make a significant contribution to the pollution of ecosystems. Heavy metals represent a specific category of particularly toxic pollutants. The main sources of their entry into the soil are related to human activity. Heavy metals are accumulated by plants, which negatively affects the condition of urban plantations. Soil contamination with heavy metals leads to significant changes in the agrochemical state of the soil and the entire ecosystem. The accumulation of heavy metals in ecosystems depends on various factors, mainly on the condition of the soil and vegetation and the level of anthropogenic impact. The article describes the quantitative content of copper, lead, cadmium, nickel and zinc in the samples of soil and leaves of silver birch growing in the territories of Moscow parks. The sample plots have been laid in different functional areas of the parks: at the alleged sources of negative impact, as well as at points farthest from anthropogenic objects. The results of the study have been compared with the standards for maximum permissible concentrations, the biological absorption coefficient has been calculated, and the accumulation of heavy metals has been revealed depending on the location of the object relative to potential sources of pollution. The soils of the plantations under study contain concentrations of heavy metals that do not exceed the MPC level. The exception is zinc. Its amount in some sample plots has been increased several times. Birch leaves have shown an uneven accumulation of heavy metals depending on both the concentrations of the elements in the soil and the location of the sample plots.

Keywords: birch, silver birch, heavy metals, environmental pollution, soil, leaves, biological absorption coefficient, Moscow parks

For citation: Dyomina E.B., Savchenkova V.A. The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 37–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-37-48>

Научная статья

Содержание тяжелых металлов в почвах и листьях насаждений березы повислой (Москва)

Е.Б. Демина[✉], аспирант; *ResearcherID*: [HHZ-9292-2022](https://orcid.org/0000-0001-7590-3819),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7590-3819>

В.А. Савченкова, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [Y-3167-2019](https://orcid.org/0000-0001-8593-7887),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8593-7887>

Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; demina1292@yandex.ru[✉], v9651658826@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.12.22 / Одобрена после рецензирования 23.04.23 / Принята к печати 26.04.23

Аннотация. Экологическое состояние городских насаждений является актуальной проблемой современности. Оно характеризует и состояние окружающей среды в целом. В структуре городов особое значение имеют городские парки и лесопарки, которые выполняют преимущественно рекреационные функции, способствуя улучшению здоровья и благополучию горожан. Посадка древесных растений, поглощающих вредные вещества, поступающие с воздухом, загрязненным промышленными предприятиями и автотранспортом, – один из основных механизмов стабилизации экологической ситуации в городах. Значительный вклад в загрязнение экосистем вносят техногенные поллютанты, весомую долю которых составляют тяжелые металлы. Тяжелые металлы входят в категорию особо токсичных загрязнителей. Основные источники их попадания в почву связаны с деятельностью человека. Тяжелые металлы накапливаются растениями, что отрицательно сказывается на состоянии городских насаждений. Загрязнение почвы тяжелыми металлами приводит к серьезным изменениям в агрохимическом состоянии почвы и во всей экосистеме. Накопление тяжелых металлов в экосистемах зависит от различных факторов, преимущественно от состояния почвы, растительности и уровня антропогенного воздействия. В статье описано количественное содержание меди, свинца, кадмия, никеля и цинка в образцах почвы из парков Москвы и листьев березы повислой, произрастающей на территориях этих парков. Пробные площади заложены в разных функциональных зонах парков: у предполагаемых источников негативного воздействия, а также в точках, наиболее удаленных от антропогенных объектов. Полученные данные сопоставлены с предельно допустимыми концентрациями, рассчитан коэффициент биологического поглощения, выявлено аккумулятивное накопление тяжелых металлов в зависимости от расположения объекта относительно потенциальных источников загрязнения. Концентрации тяжелых металлов в почвах исследуемых насаждений не превышают предельно допустимый уровень. Исключением является цинк, его количество на некоторых пробных площадях было повышено в несколько раз. Листья березы показали неравномерное накопление тяжелых металлов в зависимости как от концентраций элементов в почве, так и от расположения пробных площадей.

Ключевые слова: береза, береза повислая, тяжелые металлы, загрязнение окружающей среды, почва, листья, коэффициент биологического поглощения, парки Москвы



Для цитирования: Dyomina E.B., Savchenkova V.A. The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 37–48. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-37-48>

Introduction

Currently, the environmental situation in the urban environment of Moscow is an urgent problem, especially taking into account the active urban planning policy. Moscow is one of the most actively developing megapolises; the city's road network and rail transport are developing at a rapid pace and manufacturing enterprises are operating, which in turn affects the city's ecosystem. Environmental monitoring of urban plantations is an important basis for analyzing the conditions of urban areas and further planning corrective actions. Plants, being sensitive biological objects, accumulate pollutants. Heavy metals represent a significant proportion of anthropogenic pollutants [3]. In this regard, there is a need to study the accumulation of heavy metals by plants growing in urban plantations. Of great importance for the ecological state of Moscow are the Losiny Ostrov National Park (hereinafter – the Losiny Ostrov), which occupies a large area and is surrounded by man-made features, the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences (hereinafter – the MBG), the Kolomenskoye Museum-Reserve (hereinafter – Kolomenskoye), which are recreational facilities popular with citizens, therefore it is advisable to study the influence of man-made chemical elements on them. Silver birch *Betula pendula* Roth. (hereinafter – birch) has been chosen for the research as a species ubiquitous in Moscow plantations, exhibits resistance to negative environmental factors, and has a high dust- and gas-trapping capacity [17].

The aim of the research has been to study the content of heavy metals in the soil and silver birch leaves in the territories of the Losiny Ostrov, the MBG and Kolomenskoye.

Research Objects and Methods

To determine the content of heavy metals in the Losiny Ostrov, sample areas have been laid on 4 permanent sample plots (hereinafter – PSPs 1, 2, 3 and 4). The choice of sampling points is determined by the functional zoning of the territory, anthropogenic load, as well as the expected influence of technogenic facilities.

PSP 1 is located in a recreational area within the city and is adjacent to the highway. PSP 2 is a recreational area and the most visited peripheral part of the national park. PSP 3 is a recreational area bordering the Moscow Automobile Ring Road. PSP 4 is a protected area, located in the regional part of the national park. Therefore, the distribution of heavy metals at sampling points located in protected and recreational areas, as well as in close proximity to highways, is given depending on the location of the sample plots.

On the territory of Kolomenskoye, samples have been taken at the following sample areas: from the Moscow Polymetal Plant Side (PSP 5), from Prospekt Andropova side (PSP 6), at the intersection of Prospekt Andropova and Kashirskoye Highway (PSP 7) and in the center of the park (PSP 8). Thus, the territories with strong and weak anthropogenic impact have been surveyed.

In the MBG, samples have been taken from 3 points, – in the arboretum (PSP 9), in a natural forest area (PSP 10) and from an area adjacent to the territory of VDNKh (the Exhibition of Achievements of National Economy) (PSP 11). Such an arrangement of material collection points made it possible to estimate the load on the MBG in different functional areas and with different recreational loads.

Each sample group of plant sample (leaves) for each species under study has been made point by point and has included 50–100 leaves selected from 5–10 individual trees. The material has been collected after the leaf growth has stopped. The leaf blades have been collected from the lower part of the tree crown from the maximum number of available branches evenly around the tree. The leaves have been picked only from the shortened shoots [20]. Along with the collection of plant material, soil samples have been taken in accordance with GOST R 58595–2019 “Soils. Sampling”. The soil samples have been taken at the tree growing points using a reed soil auger, providing a sampling depth of at least 25 cm for an individual sample.

Agrochemical analyzes have been carried out at an accredited test laboratory of the Federal State Budgetary Institution State Center for Automatic State Center for Agrochemical Service “Moskovsky”.

The leaf samples have been tested for the content of heavy metals (copper, lead, cadmium, nickel and zinc). The soil has been tested for the basic agrochemical indicators (pH, hydrolytic acidity, phosphorus, potassium, ammonium nitrogen, organic matter) and heavy metals.

The soil pH has been determined in a salt extract of 1n. KCl in compliance with GOST 26483–85 “Soils. Preparation of Salt Extract and Determination of its pH by CINAO Method”; the soil hydrolytic acidity has been determined using Kappen method in compliance with GOST 26212–91 “Determination of Hydrolytic Acidity by Kappen Method Modified by CINAO”. The measurements have been carried out on a Seven Compact S220 pH meter/ionomer.

The determination of mobile phosphorus and potassium compounds by Kirsanov method modified by CINAO (GOST R 54650–2011) has been carried out using the KFK-3-01-ZOMZ spectrophotometer and the AAS-30 atomic absorption spectrophotometer.

The analysis of the quantitative content of ammonium nitrogen in the soil has been carried out using the photometric method according to GOST 26489–85 “Soils. Determination of Exchangeable Ammonium by CINAO Method” using the KFK-3-01-ZOMZ spectrophotometer.

The content of organic matter in the soil has been determined by Tyurin method according to GOST 26213–91 “Soils. Methods for Determination of Organic Matter” using the KFK-3-01-ZOMZ spectrophotometer.

To determine the content of heavy metals, dry ashing of leaf samples has been carried out in a muffle furnace with a stepwise temperature increase to 450 °C. Then the ash has been dissolved with a mixture of 10 % hydrochloric and 5 % nitric acids, transferred into 50 ml test tubes and brought to the mark with bidistilled water. The extracts obtained from the leaves have been analyzed on the “Shimadzu” AA-7000 atomic absorption spectrophotometer in accordance with the Guidelines for the Determination of Heavy Metals in Soils of Farmland and Crop Products [9]. Soil samples have been analyzed for heavy metals in accordance with ERD F 16.1:2.2:2.3:3.36–2002 “The Measurement Methodology of Gross Content of Cadmium, Cobalt, Manganese, Copper, Nickel, Lead, Chromium and Zinc in Soils, Sediments, Sewage Sludge and Waste by the Method of Flame Atomic Absorption Spectrometry”.

All the analyzes have been carried out in triplicate, and the results have been statistically processed using the analysis package in MS Excel.

The data obtained as a result of analyzes of soil concentrations has been compared with the value of the maximum permissible concentration (hereinafter – MPC) of gross forms [14]. For plants, MPCs according to Prochorova [19] have been applied. The calculation of the biological absorption coefficient (hereinafter – BAC), which is the ratio of the content of an element in a plant to the content of an element in the soil, has also been carried out [11]. With the BAC value has been about one and above, the plant has been considered as an element concentrator; if the value has been an order of magnitude higher, it has been considered a superconcentrator.

The method of statistical data processing [7] has been used in the work.

Results and Discussion

In order to study the general agrochemical state of soil conditions (basic soil indicators) of the objects of study, an analysis of agropedological conditions has been carried out first, the results of which are shown in the table below.

Due to the large volume of research, the experimental data have been grouped according to the fundamentals of statistical theory. Indicators that are close in value have been integrated into different groups.

The Basic Agrochemical Soil Indicators

Object	№ group PSP	pH KCl, units pH	Hydrolytic acidity, mmol/100 g	NH ₄ , mg/kg	P ₂ O ₅ , mg/kg	K ₂ O, mg/kg	Organic matter, %
The Losiny Ostrov	1	4.4±0.2	5.25±0.63	3.2±0.48	31±6	258±39	4.15±0.62
	2	3.9±0.2	7.59±0.91	4.8±0.72	30±6	96±14	6.07±0.61
	3	4.0±0.2	6.97±0.84	8.9±1.34	15±5	76±15	3.15±0.47
	4	5.5±0.2	1.90±0.23	5.9±0.89	15±5	116±17	3.40±0.51
	<i>Mean value</i>	4.5	5.43	5.7	23	137	4.19
The “Kolomenskoye” Museum-Reserve	5	4.4±0.2	3.40±0.41	6.3±0.95	66±13	140±21	2.02±0.40
	6	4.5±0.2	5.25±0.63	6.1±0.92	41±8	112±17	3.01±0.45
	7	4.3±0.2	4.48±0.54	8.3±1.25	96±19	147±22	4.10±0.62
	8	5.7±0.2	2.16±0.26	10.1±1.01	38±8	908±136	3.28±0.49
	<i>Mean value</i>	4.7	3.82	7.7	60	327	3.10
The N.V. Tsitsin Main Botanical Garden	9	5.7±0.2	2.21±0.27	5.9±0.89	139±28	71±14	4.70±0.71
	10	5.7±0.2	1.74±0.21	6.4±0.96	210±42	79±16	2.72±0.54
	11	5.5±0.2	1.98±0.24	6.2±0.93	63±13	125±19	2.56±0.51
	<i>Mean value</i>	5.6	1.98	6.2	137	92	3.33

According to the data in the table, the soil in the Losiny Ostrov is predominantly strongly acid. At PSP 4 it is neutral.

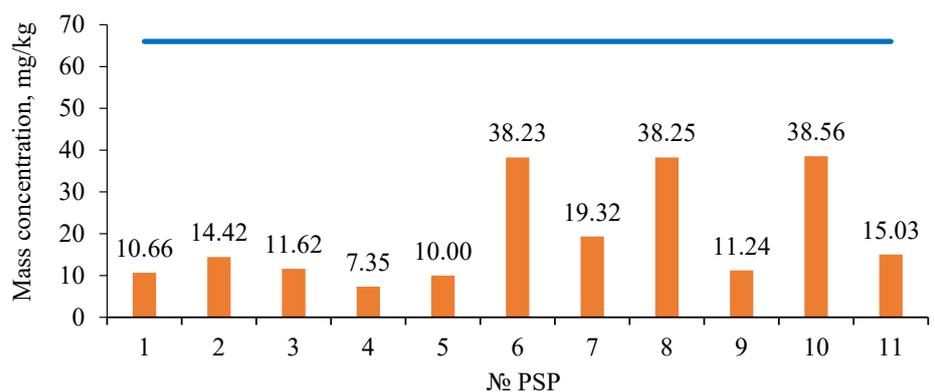
In Kolomenskoye, the soils are strongly and moderately acidic, as well as close to neutral.

In the MBG the soils are close to neutral. The mass fraction of exchangeable ammonium in the studied soils is in the average range for sod-podzolic soils. The provision of soils with mobile phosphorus and exchangeable potassium in the studied sites is extremely uneven [5].

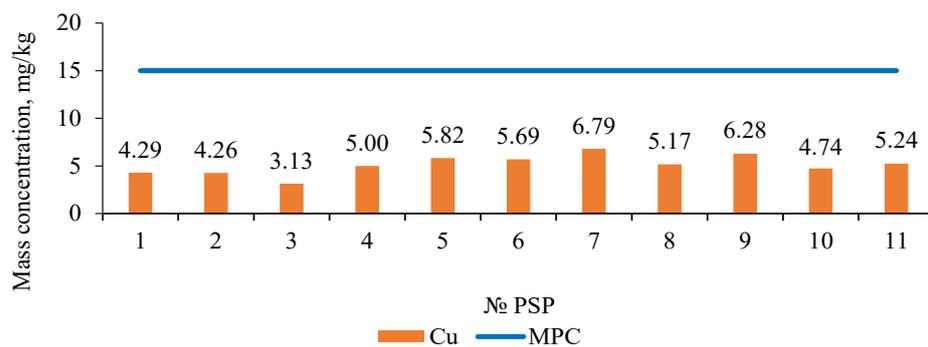
Low phosphorus content has been found in the Losiny Ostrov, medium – in the MBG, low and medium – in Kolomenskoye.

A very high provision of soils with exchangeable potassium has been found in PSP 1 and PSP 8, an increased provision – in PSPs 5, 7 and 11; medium – in PSPs 2, 4, 6 and 10, low content has been recorded in PSPs 3, 9 and 10. According to the content of organic matter in the upper soil horizon, it has been revealed that the studied samples have medium and high humus content.

In the course of the study on the PSPs, data on the content of heavy metals in the soil have also been obtained. However, to calculate the BAC, which characterizes the degree of the element accumulation, it has become necessary to identify heavy metals in birch leaves (Fig. 1–5).



a



b

Fig. 1. The copper content in the soil (*a*) and birch leaves (*b*)

Copper is an important element involved in the plant physiological and biochemical processes. The optimal amount of copper in the soil is considered to be 5–20 mg/kg. A sufficient amount of copper in the soil increases the photosynthesis intensity, promotes plant disease resistance and increases drought and frost resistance. High concentrations of copper are toxic to plants, which manifests itself in the form of slow growth, browning and leaf death. Fig. 1 shows that the mass concentration of copper both in the soil and birch leaves in all the sample plots under study is within the MPC norm. The highest values have been recorded in Kolomenskoye and in the MBG; the lowest copper content in the soil has been recorded in the protected area of the Losiny Ostrov. In all the sample plots, the coefficient of biological absorption of copper is less than 1, which means that birch is not a concentrator of this metal.

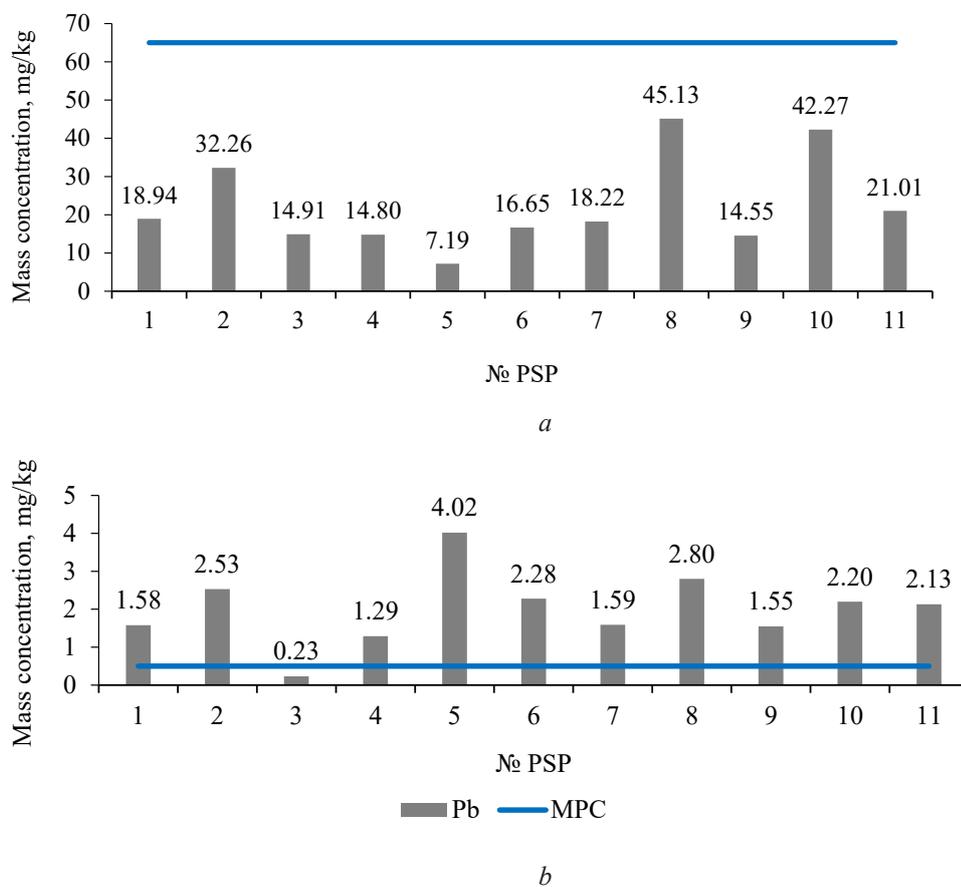


Fig. 2. The lead content in the soil (a) and birch leaves (b)

Lead is a highly toxic heavy metal and belongs to the class of substances highly hazardous to living organism (GOST 17.4.1.02–83 «Nature Protection. Soils. Classification of Chemicals for Pollution Control»). High concentrations of lead in plants are typical for technogenic territories, areas with high anthropogenic load and near industrial enterprises. The increased lead content in plants inhibits photosynthesis and respiration. Visually, an excess of lead is manifested by the intense dark green color of the leaves, their rolling and death. As can be seen in

Fig. 2*a*, the lead content in the studied soil is below the MPC. At the same time, the results obtained for the lead concentration in the leaves (Fig. 2*b*) on all sample plots significantly exceed the inspection standard. An exception is the trial plot located in the recreational area of the Losiny Ostrov. The highest value has been detected in birch leaves in Kolomenskoye at PSP 5; it exceeds the MPC by 8 times. Presumably, such a severe lead contamination can be explained by the close proximity of the sample plot to several technogenic facilities: the Moscow Polymetal Plant, the Research Institute of Chemical Technology, the Dukhov Automatics Research Institute and the Kuryanovsky Sewage Treatment Plant on the opposite bank of the Moscow River.

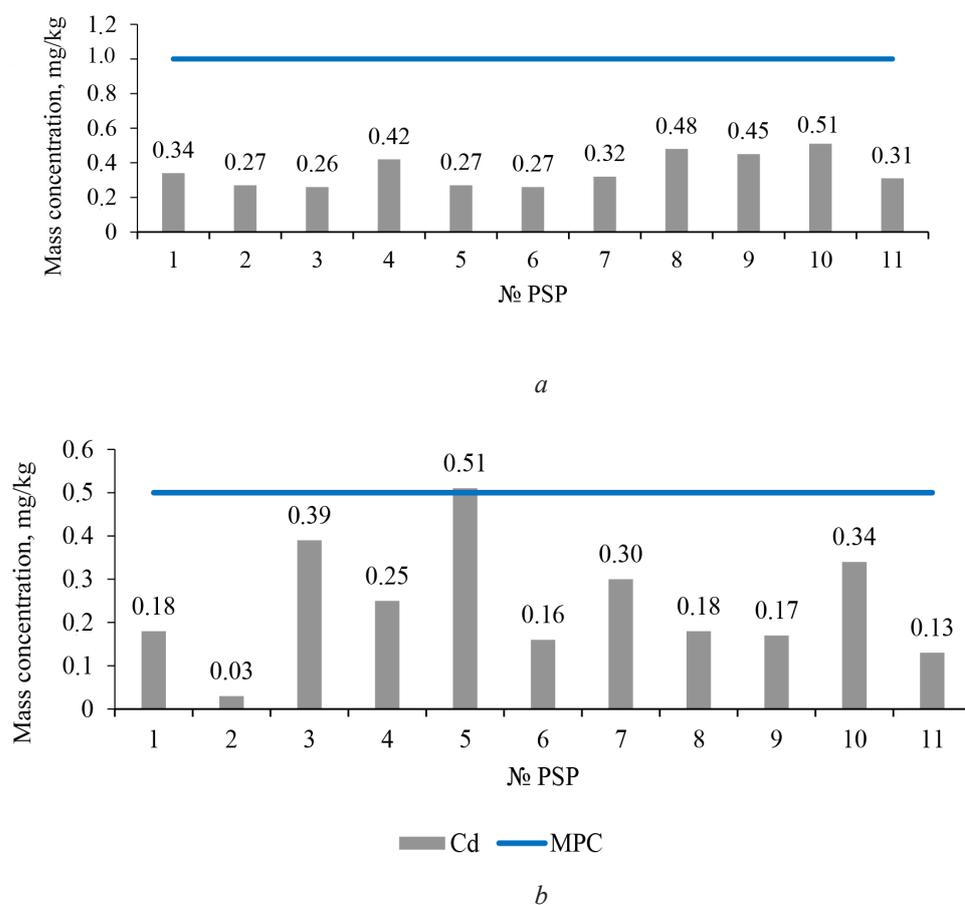


Fig. 3. The cadmium content in the soil (*a*) and birch leaves (*b*)

Cadmium is an element that does not have a positive biological effect on plants; however, there is evidence that it specifically promotes the synthesis of certain amino acids [12]. Cadmium, like lead, is a highly toxic heavy metal; its increased content has negative consequences for plant organisms. This element interferes with normal metabolism, disrupts the processes of carbon dioxide fixation and transpiration, and inhibits photosynthesis. Signs of the cadmium toxic effect are damage to the root system, slowdown in plant growth and development, change in leaf color to red-brown and chlorosis [13]. According to the results of our analyzes (Fig. 3*a*, *b*), cadmium in the soil is within the MPC, its average values are 2–3 times lower than the MPC,

which indicates a slight intake of cadmium into the soil from the atmosphere. In the birch leaves, the value of cadmium concentration at the MPC boundary has been recorded at PSP 5; the reason for accumulation, in our opinion, is the cluster of technogenic facilities near this sample plot. The BAC value at PSP 7 is 0.94, which indicates the concentration of cadmium by birch.

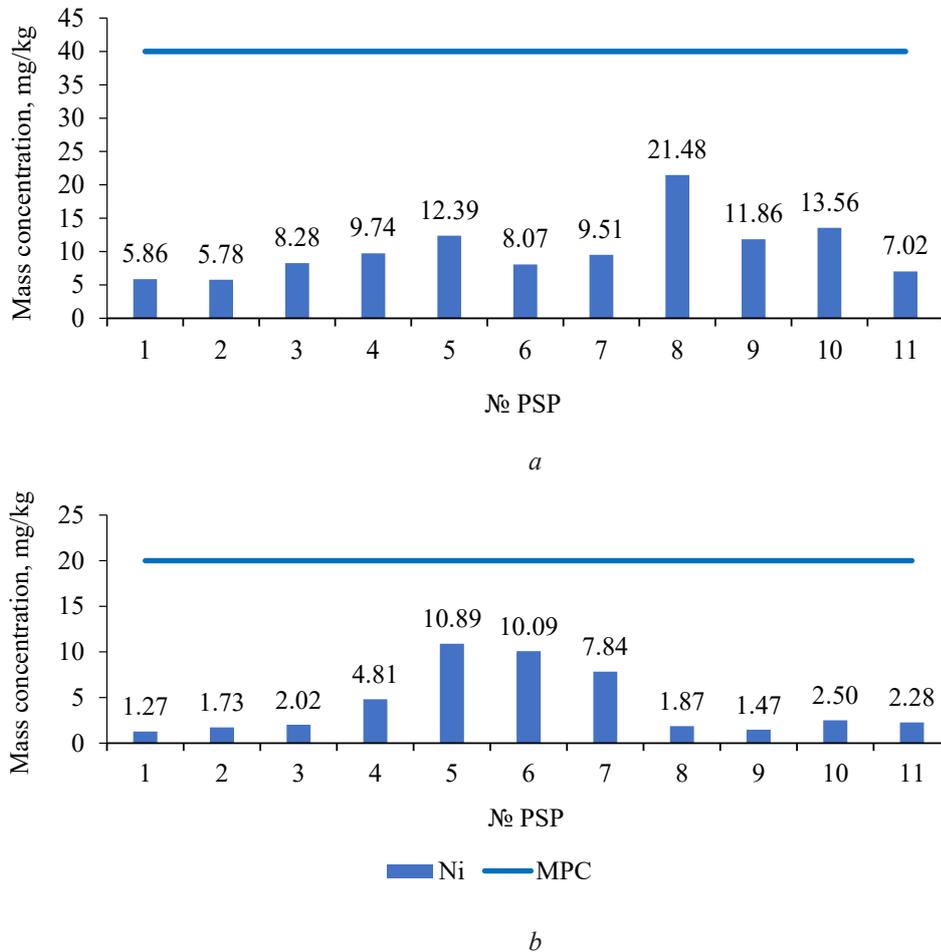


Fig. 4. The nickel content in the soil (*a*) and birch leaves (*b*)

At present, nickel in small concentrations is considered an essential microelement for plants, but its biological and agricultural value has been little studied [18]. To date, there is no data in the literature on the negative impact of nickel deficiency on plants, however, a number of experiments have revealed a positive effect of nickel application to soils on the yield of some agricultural crops [1, 15]. An excess of nickel in plants causes suppression of photosynthesis and transpiration processes, as well as the appearance of signs of leaf chlorosis, and deformation of plant organs [4, 6]. In the soil samples we have tested, the nickel content has turned out to be low (Fig. 4*a*). The maximum nickel concentrations in birch leaves (Fig. 4*b*) have been found in the sample plots in Kolomenskoye, which once again indicates a strong anthropogenic impact on the site. The BAC at PSP 7 is 1.25, which means that nickel is concentrated by birch in this area.

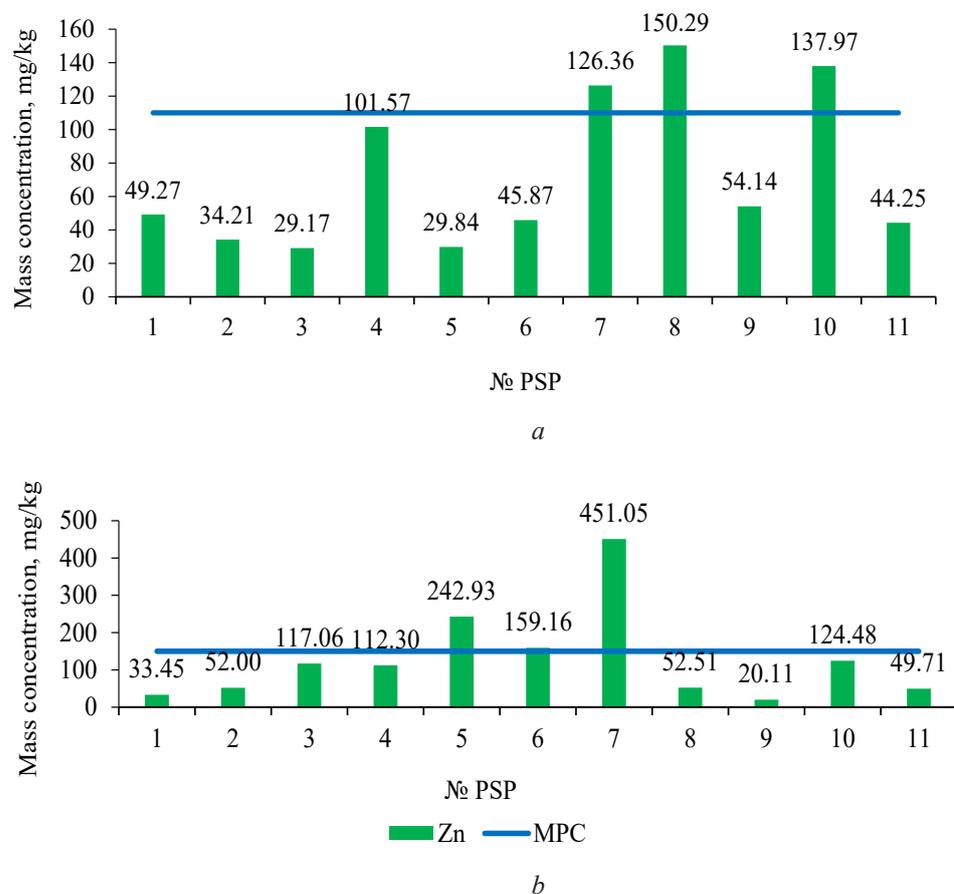


Fig. 5. The zinc content in the soil (a) and birch leaves (b)

Zinc is a toxic heavy metal, but unlike lead and cadmium, it is an important element for plant nutrition [2]. The physiological role of zinc is the activation of many enzymatic reactions. A high zinc concentration in the soil leads to slower growth and reduces fruiting of plants. Typical signs of zinc excess are leaf chlorosis and a slow plant growth. It has been established that the death of sensitive species of terrestrial plants can be observed at zinc concentrations in the soil of more than 100 mg/kg. Meanwhile, the symptoms of toxicity appear when this metal accumulates at concentrations of 100–300 mg/kg of dry weight, which depends on the plant species and genotype, as well as soil characteristics [16]. In the sample plots we have studied, excesses of the MPC of zinc in the soil have been found (Fig. 5a) in Kolomenskoye and in the MBG. Increased concentrations of zinc have also been found in birch leaves (Fig. 5b). Based on the data obtained, the BAC has been calculated, which has shown that birch trees at PSPs 2, 4, 10 and 11 exhibit concentration, and at PSPs 3, 5, 6 and 7 – overconcentration of zinc. The concentration of zinc in birch has been repeatedly noted by various researchers [8, 10, 11] and has been confirmed in our work.

Conclusion

Based on the results of the study of the soils and birch leaves in the Losiny Ostrov, the MBG and Kolomenskoye, a number of conclusions can be drawn regarding the ecological state of these natural objects. Concentrations of heavy metals in the soils of the studied plantations do not exceed the MPC level. The exception is zinc; its amount in some sample plots has been increased several times. However, it is the least toxic of all the heavy metals presented in the study.

The birch leaves have shown an uneven accumulation of heavy metals, depending on both the concentrations of elements in the soil and the location of the sample plots. In the leaves, the content of copper and cadmium is within the standards for all the sample plots laid.

It is significant that the excess of the MPC of lead in the leaves has been found in all the sample plots, which indicates a significant impact of technogenic facilities. The content of nickel in leaves does not exceed the MPC in any sample plot. Therefore, its impact on the environmental situation under these conditions is minimal.

The MPC of zinc in leaves is exceeded in Kolomenskoye. The data obtained has shown the need to continue studying the content of heavy metals in urban plantations experiencing a complex anthropogenic load.

REFERENCES

1. Andrienko L.N., Aksenova Yu.V. Influence of Application of Cadmium, Nickel, Zinc on the Level of Their Content in Soil, Productivity and Quality of Root Crops. *Zemledelie*, 2018, no. 8, pp. 23–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10807>
2. Bityutskij N.P. *Essential Plant Microelements*. Saint-Petersburg, DEAN Publ., 2005. 256 p. (In Russ.).
3. Bol'shakov V.A., Gal'per N.Ya., Klimenko G.A., Lytkina T.I., Bashta E.V. *Contamination of Soils and Vegetation with Heavy Metals*. Moscow, All-Union Research Institute of Information and Techno-Economic Research on Agriculture Publ., 1978. 52 p. (In Russ.).
4. Demchenko N.P., Kalimova I.B., Demchenko K.N. Effect of Nickel on Growth, Proliferation and Differentiation of Root Cells in *Triticum aestivum* Seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2005, vol. 52, pp. 250–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11183-005-0034-5>
5. Ganzhara N.F., Borisov B.A. *Soil Science and Basic Geology: Textbook*. Moscow, INFRA-M Publ., 2019. 352 p.
6. Kositsin A.V., Alekseeva-Popova N.V. The Effect of Heavy Metals on Plants and Mechanisms of Metal Resistance. *Rasteniya v ekstremal'nykh usloviyakh mineral'nogo pitaniya*. Leningrad, Nauka Publ., 1983, pp. 5–22. (In Russ.).
7. Kozhevnikov S.P. *Algorithms of Biological Statistics: Guidance Manual*. Izhevsk, Udmurt University Publ. Center, 2018. 75 p. (In Russ.).
8. Krupnova T.G., Rakova O.V., Gavrilkina S.V., Antoshkina E.G., Baranov E.O., Dmitrieva A.P., Somova A.V. Extremely High Concentrations of Zinc in Birch Tree Leaves Collected in Chelyabinsk, Russia. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, vol. 43, pp. 2551–2570. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00605-3>
9. Kuznetsov A.M., Fesyun A.P., Samokhvalov S.G., Makhon'ka E.P. *Guidelines for the Determination of Heavy Metals in Soils of Farmland and Crop Products*. 2nd ed. Moscow, Ministry of Agriculture of the Russian Federation, CIANO Publ., 1992. 61 p. (In Russ.).

10. Kuznetsova T.Yu., Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Heavy Metals Accumulation in Various Organs and Tissues of Birch Trees Depending on Growth Conditions. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk*, 2015, no. 1, pp. 86–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eco27>
11. Lovkova M.Ya., Rabinovich A.M., Ponomareva S.M., Buzuk G.N., Sokolova S.M. *Why Do Plants Heal?* Moscow, Nauka Publ., 1990. 256 p. (In Russ.).
12. Lukin S.V., Selyukova S.V., Prazina E.A., Chetverikova N.S. A Comparative Evaluation of Macro- and Microelement Composition of Plants of White Lupine and Soybean. *Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2018, vol. 5, iss. 6, pp. 6133–6137.
13. Lukin S.V., Selyukova S.V., Chernikov V.A., Galtova A.A. Ecological Estimation of Cadmium Content in Agricultural Censuses of the Central Chernozem Region of Russia. *Pollution Research*, 2020, vol. 39, no. 2, pp. 196–201.
14. *Maximum Permissible Concentrations (MPCs) of Chemical Substances in Soil: Hygienic Regulations 2.1.7.2041-06*: appr. by the Ministry of Justice since 07.02.2006. Moscow, Federal Hygienic and Epidemiological Center of Rosпотребнадзор, 2006. 15 p. (In Russ.).
15. Mudrik V.A., Kulikov S.S., Novichkova N.S., Red'kina N.V., Luchitskaya O.A., Ivanov B.N. Effect of Microfertilizers on Associative Nitrogen Fixation and Productivity of Spring Wheat. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*, 2010, no. 9, pp. 72–76. (In Russ.).
16. Noulas C., Tziouvalekas M., Karyotis T. Zinc in Soils, Water and Food Crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2018, vol. 49, pp. 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>
17. Petunkina L.O., Sarsatskaya A.S. Phytoindication State of *Betula pendula* in the Urban Environment of Kemerovo. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Kemerovo State University*, 2015, vol. 3, no. 4(64), pp. 68–71. (In Russ.).
18. Polacco J.C., Mazzafera P., Tezotto T. Opinion: Nickel and Urease in Plants: Still Many Knowledge Gaps. *Plant Science*, 2013, vol. 199–200, pp. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.10.010>
19. Prochorova N.V., Matvejev N.M. Heavy Metals in Soils and Plants during Technogenic Conditions. *Vestnik SamGU*, 1996, pp. 125–148. (In Russ.).
20. Zakharov V.M., Chubinshvili A.T. *Environmental Health Monitoring in Protected Natural Areas*. Moscow, Center for Russian Environmental Policy, 2001. 148 p. (In Russ.).

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

Обзорная статья

УДК 630*187

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-49-67

Сравнительный анализ эколого-флористической классификации и лесных типологий России

Н.С. Иванова^{1,2}, *д-р биол. наук*; *ResearcherID: Q-3292-2017*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>

В.В. Фомин^{1,2}, *д-р биол. наук, доц.*; *ResearcherID: J-3404-2017*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

С.В. Залесов¹, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: H-2605-2019*,

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

А.П. Михайлович³, *ст. преподаватель*; *ResearcherID: AAN-5903-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; i.n.s@bk.ru, fomval2011@yandex.ru[✉], zalesovsv@m.usfeu.ru

²Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; i.n.s@bk.ru

³Уральский федеральный университет, ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Россия, 620002; anna.mikhailovich@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.22 / Одобрена после рецензирования 18.09.22 / Принята к печати 21.09.22

Аннотация. В начале XX в. в Европе сформировалось научное направление, получившее название фитосоциология, родоначальником которой стал швейцарский ботаник и эколог Дж. Браун-Бланке. Разработанный им подход получил широкое распространение в мире и лег в основу большого количества классификаций растительности. В статье приведено описание эколого-флористического подхода к классификации растительности по следующим параметрам: объему понятия ассоциации, особенностям выделения ее границы, классификационным признакам для установления типа лесорастительных условий и для определения ассоциации, учету сукцессионной динамики, влияния антропогенных факторов, уровню внедрения в практику ведения лесного хозяйства, управления лесами и отчетности. Дан обзор современного состояния подхода и приведены результаты его сравнения с отечественными лесными типологиями. К преимуществам классификации Брауна-Бланке можно отнести ее универсальность, развитую методологию, гибкость классификационных критериев и тщательно продуманную номенклатуру. Разработка программного комплекса Turboveg для ввода, хранения и обработки данных о растительности способствовала росту объемов использования классификации. В настоящее время, кроме признаков растительности, обязательным становится учет климатических параметров, а при выделении синтаксонов и формировании картографических представлений о растительности используют современные достижения в области ГИС-технологий для оценки факторов, которые влияют на структуру растительности. Отражение сукцессионной динамики в синтаксономических единицах по-прежнему остается актуальной задачей как эколого-флористического подхода, так и отечественных лесных типологий. В рамках подхода Брауна-Бланке также активно прорабатываются аспекты, связанные с учетом антропогенных трансформаций

растительных ассоциаций. Об этом свидетельствует ряд успешных примеров оценки синантропизации лесов и моделирования функций отклика растительных сообществ на действие экологических факторов, включая антропогенные. Как и в лесных типологиях, при разработке эколого-флористических классификаций широко используются многомерные методы анализа данных (DCA, CCA, PCA с наложением на ординационные диаграммы векторов) для исследования структуры лесной растительности.

Ключевые слова: синтаксономия Брауна-Бланке, эколого-флористический подход, классификация типов леса, современное состояние классификаций типов леса, российские лесные типологии, растительная ассоциация, сукцессионная динамика, антропогенные факторы

Благодарности: Анализ эколого-флористической классификации Брауна-Бланке выполнен в рамках госзадания Ботанического сада УрО РАН. Часть исследований, связанных с анализом подхода европейских классификаций фитоценологических альянсов и местообитаний EUNIS, европейской классификации типов леса (EFT) и североамериканской биогеоклиматической классификации, выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FEUG-2023-0002).

Для цитирования: Иванова Н.С., Фомин В.В., Залесов С.В., Михайлович А.П. Сравнительный анализ эколого-флористической классификации и лесных типологий России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 49–67. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-49-67>

Review article

Comparative Analysis of the Ecological-Floristic Classification and the Russian Forest Typologies

Natalya S. Ivanova^{1,2}, Doctor of Biology; ResearcherID: [Q-3292-2017](https://orcid.org/0000-0003-0845-9433),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>

Valery V. Fomin^{1,2}, Doctor of Biology, Assoc.Prof.; ResearcherID: [J-3404-2017](https://orcid.org/0000-0002-9211-5627),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

*Sergey V. Zalesov*¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

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

*Anna P. Mikhailovich*³, Senior Lecturer; ResearcherID: [AAN-5903-2020](https://orcid.org/0000-0002-8282-9431),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

¹Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; i.n.s@bk.ru, fomval2011@yandex.ru[✉], zalesovsv@m.usfeu.ru

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; i.n.s@bk.ru

³Ural Federal University, ul. Mira, 19, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; anna.mikhailovich@gmail.com

Received on May 26, 2022 / Approved after reviewing on September 18, 2022 / Accepted on September 21, 2022

Abstract. At the beginning of the 20th century in Europe, a scientific direction was formed, called phytosociology, the founder of which was the Swiss botanist and ecologist J. Braun-Blanquet. The approach he developed has become widespread throughout the world and has formed the basis for a large number of vegetation classifications. The article provides a description of the ecological-floristic approach to vegetation classification according



to the following parameters: the scope of the concept of association, the peculiarities of its boundary allocation, the classification criteria for establishing the type of forest conditions and for determining the association, consideration of the succession dynamics and the influence of anthropogenic factors, the level of implementation in forestry, forest management and reporting. An overview of the current state of the approach is given and the results of its comparison to the Russian forest typologies are presented. The advantages of the Braun-Blanquet classification include its versatility, developed methodology, flexibility of classification criteria and a carefully thought-out nomenclature. The development of the Turboveg software package for entering, storing and processing vegetation data has contributed to the increase in the use of this classification. Currently, in addition to vegetation features, it is becoming mandatory to take into account climatic parameters, and when identifying syntaxa and forming cartographic representations of vegetation, modern advances in the field of GIS technologies are used to assess the factors that influence the vegetation structure. The reflection of successional dynamics in syntaxonomic units still remains an urgent task for both the ecological-floristic approach and the domestic forest typologies. Within the framework of the Braun-Blanquet approach, aspects related to the consideration of anthropogenic transformations of plant associations are also being actively studied. This is evidenced by a number of successful examples of assessing forest synanthropization and modeling the response functions of plant communities to environmental factors, including anthropogenic ones. As in forest typologies, multidimensional methods of data analysis (DCA, CCA, PCA with superimposition of vectors on ordination diagrams) are widely used in the development of ecological-floristic classifications for studying the structure of forest vegetation.

Keywords: the Braun-Blanquet syntaxomy, ecological-floristic approach, forest type classification, current state of forest type classifications, the Russian forest typologies, plant association, succession dynamics, anthropogenic factors

Acknowledgements: The analysis of the Braun-Blanquet ecological-floristic classification was carried out within the framework of the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Part of the research related to the analysis of the approaches of the European classifications of phytocenological alliances and habitats EUNIS, the European classification of forest types (EFT) and the North American biogeoclimatic classification was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FEUG-2023-0002).

For citation: Ivanova N.S., Fomin V.V., Zalesov S.V., Mikhailovich A.P. Comparative Analysis of the Ecological-Floristic Classification and the Russian Forest Typologies. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 49–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-49-67>

В первые десятилетия XX в. в Европе сформировалось научное направление, получившее название фитоценология. Ее родоначальником стал швейцарский ботаник и эколог Дж. Браун-Бланке [53, 88]. В прошлом столетии было опубликовано большое количество фитоценологической литературы и сформировалось множество научных школ, отличающихся разными подходами к классификации растительности, особенно в Южной и Восточной Европе [77, 82, 88, 89]. Есть примеры успешного применения эколого-флористического подхода к изучению растительности Японии [75]. В СССР подход Брауна-Бланке стал применяться с 1960 г. [27]. В настоящее время в Российской Федерации данный подход практикуется Уфимской [21], Дальневосточно-Сибирской [7, 9,

58, 59], Санкт-Петербургской [2, 23, 44], Московской [11, 31, 36], Тольяттинской [6] и Брянской [4] научными школами. Ведущие российские синтаксономисты активно обмениваются опытом [3, 8, 28, 63] и проводят инвентаризацию и систематизацию биогеоценозов, создают фитоценоотические базы данных и разрабатывают единую классификацию растительности России [32]. Несмотря на многочисленность исследований на тему инвентаризации и классификации растительности, остаются вопросы, решение которых необходимо для прогнозирования устойчивости биосферы в условиях нарастающего антропогенного воздействия, глобального и регионального изменений климата. В лесоведении данная проблема стоит так же остро [20, 61, 62], и различные лесотипологические школы ведут активную работу в этом направлении [60, 66]. Однако ввиду сложности и большого разнообразия лесных экосистем проблема до сих пор не решена и требуется не только получение новых данных о структуре и динамике растительности, но и дальнейшая разработка теоретических основ классифицирования природных комплексов. Для этого в первую очередь необходимо подвести итог деятельности различных школ, осуществляющих исследования в этом направлении как в фитоценологии, так и в лесоведении, выявить сильные (пригодные к использованию) и слабые (от которых следует уходить) стороны каждого из предлагаемых подходов.

Цель данной статьи – обобщение опыта использования эколого-флористической классификации в разных странах и сравнение ее характеристик с основными положениями российских лесотипологических подходов.

Основная классификационная единица. Основной единицей растительного покрова в фитосоциологических классификациях является растительная ассоциация (plant association, или coenotaxon) [88], которая, согласно Брауну-Бланке (см. таблицу), является фундаментальным уровнем в иерархической классификации биосферы. Это абстрактная единица, формируемая комбинацией видов, называемых характерными, которые могут быть определены по различным правилам [88]. Остальные виды, также присутствующие в растительной ассоциации, но не являющиеся характерными для нее, связывают эту ассоциацию с другими. Описание таких видов позволяет получить растительный континуум в пространстве и времени [89]. Это является одной из сильных сторон эколого-флористической классификации и отличает ее от лесных типологий: ни в одной отечественной лесной типологии видовой состав не анализируется на предмет связи с другими типами леса. В биогеоценотической типологии В.Н. Сукачева и динамической И.С. Мелехова для выделения типов леса используются только доминирующие виды древесного и подчиненных ярусов растительности, а также отдельные виды живого напочвенного покрова или положение в рельефе в качестве индикаторов условий местопроизрастания [24, 39].

В генетической типологии, как и в синтаксономии Брауна-Бланке, для выделения флористического комплекса типов леса или стадии дигрессивно-дедуктивных сукцессий могут использоваться, кроме доминантов, индикаторные виды (виды-маркеры) [42, 43]. В лесоэкологической типологии Е.В. Алексева – П.С. Погребняка применяется главным образом состав древостоя с учетом требовательности растений к трофности и влажности почв [25, 26, 33]. Следует также отметить классификации, разработанные Л.Г. Раменским [34], в которых среда обитания признается основным фактором дифференциации растительности, а экологическая оценка местообитаний дается на основе фитоиндикации, что сближает эти классификации с эколого-флористической классификацией Брауна-Бланке.

Эколого-флористическая классификация Брауна-Бланке
The Braun-Blanquet ecological-floristic classification

Характеристика	Особенности
Объем понятия ассоциации	Растительная ассоциация – это тип растительности, определяющий фундаментальный уровень в иерархической классификации биосферы. Ассоциация включает в себя комбинацию видов, называемых характерными, которые могут быть определены по различным правилам. Растительные ассоциации выделяют в пределах общего географического ареала характерных для них видов. Гиперобъем растительной ассоциации в многомерном экологическом пространстве определяет ее экологическую нишу. Другие виды, не относящиеся к характерным для ассоциации, в основном ответственны за связь между различными ассоциациями, которая дает растительный континуум в пространстве и во времени. Граница определяется по смене растительности. Нет четких границ. Понятие экотона хорошо разработано
Классификационные признаки, используемые для определения типа лесорастительных условий	Первоначально предложены только признаки растительности. В настоящее время в связи с необходимостью разработки карт растительности различных масштабов и использованием ГИС-технологий в основе классификаций начинает преобладать географический принцип. Обязательным становится учет климатических факторов, а выделение синтаксонов и картографические представления сочетают в себе биогеографию и оценку факторов, которые влияют на потенциальную и фактическую структуру растительности. Однако важность и степень детализации отдельного фактора различаются по иерархическим уровням классификации. Набор факторов и их роль в классифицировании растительности могут заметно различаться в зависимости от страны и региона, т. к. лимитирующие распространение растений факторы имеют региональную специфику
Учет сукцессионной динамики	Признан факт динамической совокупности видов в сообществах, которые подвержены флуктуациям, антропогенным трансформациям. Этот факт лег в основу методики анализа пространственно-временных закономерностей. Вводится понятие сукцессионной системы – совокупности климаксового типа растительности и всех формирующихся в дальнейшем вторичных сообществ, служащих стадиями ее восстановления. Есть примеры обсуждения возможности использования синтаксонов флористической классификации для анализа вторичных восстановительных сукцессий после рубок, подходов к выделению серий и стадий сукцессии, а также подходов к общей оценке сукцессионных серий, анализа сукцессии растительных сообществ на вырубках, исследования процессов дивергенции и конвергенции сукцессионных серий
Учет влияния антропогенных факторов	Анализ видового состава позволяет выявить исчезновения и инвазии видов и тем самым оценить антропогенное воздействие. Классификационные критерии растительных сообществ (характерное сочетание видов, специфические взаимоотношения с физической средой, хорологические и динамические особенности) придают фитосоциологическим единицам сильное индикаторное значение. Примеров такого анализа антропогенных трансформаций растительности достаточно много
Уровень внедрения в практику ведения лесного хозяйства, управления лесами и отчетности	Высокий. На общеевропейском уровне косвенно используется через кросс-связи в Европейской классификации типов леса EFT. Разработан программный комплекс Turboveg для ввода, хранения и обработки данных о растительности, составлено множество национальных и региональных баз данных, которые включают миллионы геоботанических описаний, доступных в Turboveg. Базы данных послужили основой для национальных и международных классификационных обзоров, а также научных исследований. Фитосоциологические таблицы широко доступны. В Северной Америке используется в Биоклиматической классификации экосистем ВЕС. В России в лесоустройстве и лесном хозяйстве практически не применяется, но широко распространена в сфере охраны природы

Ассоциация в подходе Брауна-Бланке крупнее типа леса в биогеоэцено- тическом и генетическом подходах к лесной типологии и более близка по объ- ему к группе типов леса. Хотя количество ассоциаций, которые могут быть идентифицированы, не ограничено, их значительно меньше, чем типов леса по В.Н. Сукачеву и Б.А. Ивашкевичу – Б.П. Колесникову. Выделение ассоциаций в соответствии с подходом Брауна-Бланке основано на достаточно поверхностном описании растительного сообщества, часто в терминах видового обилия, выра- женного долей покрытия или другой переменной [50]. В этом заключается отли- чие подхода от отечественных лесных типологий, в которых для характеристики типа леса обязательны количественные показатели, в т. ч. продуктивность древо- стоя, численность, возраст и высота подроста древесных растений [17, 18, 35, 38].

Для исследования ассоциаций выделяют пробные площади. Пробные площади (*relevés*, в терминах подхода Брауна-Бланке) – это субъективно ото- бранные объекты изучения с произвольной площадью [50]. Тем не менее проб- ная площадь здесь, как правило, значительно меньше, чем при лесотипологиче- ских исследованиях, где обязательным требованием является наличие не менее 200 деревьев основного элемента леса.

Сходные ассоциации включаются в набор более высокого иерархического уровня, называемый союзом (*alliance*), союзы объединяются в порядки (*order*) и да- лее в классы (*class*) [50]. В настоящее время такая классификация создается, в отли- чие от лесных типологий (которые также являются иерархическими), по правилам Международного кодекса фитосоциологической номенклатуры ICPN [56, 86, 87].

Классификационные признаки, используемые для определения синтак- сонов. Первоначально для выделения синтаксонов в эколого-флористической классификации применялись только признаки растительности. Однако в на- стоящее время в связи с необходимостью разработки карт растительности раз- личных масштабов и использованием ГИС-технологий происходит сближение эколого-флористического подхода с генетической лесной типологией [14]. В основе классификаций все чаще преобладает географический принцип [52]. Обязательным становится учет климатических факторов, а выделение синтак- сонов и формирование картографических представлений начинают сочетать в себе биогеографию и оценку факторов, обуславливающих особенности потен- циальной и существующей структур растительности. Географический принцип [29, 30] выходит на позицию одного из главных при выделении как ассоциаций, так и синтаксонов более высокого ранга. При этом важность и уровень детали- зации каждого фактора различаются по иерархическим уровням классифика- ции [52], как и в генетической лесной типологии. Так, например, для Италии в качестве иерархических уровней классификации используют подразделения, провинции, секции и подсекции [52]. Набор факторов и их роль в классифици- ровании растительности могут значительно различаться для стран и регионов, т. к. факторы, лимитирующие распространение растений, характеризуются ре- гиональной спецификой [46, 49, 64, 69]. Классификации становятся региональ- ными, хотя они и основаны на общих принципах. При этом правильная инте- грация социологии растений и экологического анализа понимается как ключ к иерархической классификации экосистем [55].

Происходит сближение подхода Брауна-Бланке и лесных типологий, в ко- торых классификационные схемы и определители типов леса строятся на основе скрупулезного экологического анализа и детального учета как климатических,

так и эдафических факторов [5, 25, 26]. Для целей экологического анализа в рамках эколого-флористического подхода [80, 85], как и в лесных типологиях [14, 40, 70, 71], получают распространение многомерные методы анализа (DCA – бестрендовый анализ соответствий, CCA – канонический анализ соответствий, PCA – анализ линейного уменьшения размерности) с наложением на ординационные диаграммы векторов (факторов), характеризующих среду обитания. Разработка новых многомерных методов анализа и появление доступа к международным базам данных стимулировали увеличение глубины и масштаба экологического анализа, который стал включать сравнение синтаксонов из различных географических регионов [57–59, 80] и интерпретацию результатов с международной точки зрения [78, 80]. Есть примеры успешного моделирования функций отклика растительных ассоциаций на градиенты окружающей среды, включая соленость почвы и грунтовых вод, pH почвы, температуру почвы и грунтовых вод, долю песка и колебание уровня грунтовых вод [48]. На основе теории нечетких множеств разрабатываются и успешно используются методики исследования реакции ассоциации (или любого другого синтаксона) на градиенты окружающей среды [48, 50], в т. ч. методика расчета функции отклика ассоциации на градиенты окружающей среды, которая представляет собой кривую совместимости ассоциации с градиентом окружающей среды. Кривые совместимости показывают возможность обнаружения при определенном значении фактора окружающей среды или комбинации факторов видовой комбинации, соответствующей растительной ассоциации. Этот метод используется для получения карт потенциального распределения ассоциации (карты пригодности) с помощью ГИС [50]. Карты пригодности могут быть подвергнуты многокритериальному анализу, чтобы присвоить вес различным факторам при установлении синтаксонов растительности. Такие карты важны для моделирования изменений почвенного покрова, например клеточными автоматами [50]. Развитие ГИС-технологий способствовало прогрессу в картографическом представлении растительности в рамках подхода Брауна-Бланке [51].

Учет сукцессионной динамики. Уже на этапе зарождения эколого-флористического подхода был признан факт динамической совокупности видов в сообществах, которые подвержены флуктуациям и антропогенным трансформациям [50, 53]. С результатами исследований В. Джакомини (V. Giacomini), Р. Туксена (R. Tuxen), Дж.-М. Геху (J.-M. Gehu), К. Бегуина (C. Beguin), О. Хегга (O. Hegg), С. Ривас-Мартинеса (S. Rivas-Martinez) и Ж.-Е. Дю Ритца (G.-E. Du Rietz) связана концепция синассоциаций [65]. С 1970-х гг. в фитосоциологии наблюдается активный переход от определения взаимоотношений между растительными ассоциациями, которыми формируются растительные элементы ландшафта, к сериям и цепочкам типов растительности, появляющихся (сменяющих друг друга) в пределах конкретной территории. Они включают как метастабильные стадии серий, так и экологически зрелое стабильное состояние – климаксовую стадию [54]. Данная концепция очень близка к использованной основоположником генетического подхода Б.А. Ивашкевичем [16].

Постулат о динамической совокупности видов в сообществах лег в основу методики анализа пространственно-временных закономерностей и масштабных зависимостей [47]. С целью разработки данной методики вводится поня-

тие растительного ряда (sigmetum) как сукцессионной системы – совокупности растительности климаксового типа и всех формирующихся в дальнейшем вторичных сообществ, служащих стадиями ее восстановления [51]. Есть примеры обсуждения возможности использования синтаксонов флористической классификации для анализа вторичных восстановительных сукцессий после рубок [21], серий и стадий сукцессии, а также для общей оценки сукцессионных серий: анализа динамики альфа-разнообразия и фитосоциологических спектров растительных сообществ, определения бета-разнообразия сукцессионной серии [76], анализа восстановительной сукцессии растительных сообществ на вырубках чернично-зеленомошных лесов союза *Dicrano–Pinion* центрально-возвышенной части Южного Урала [84], анализа сукцессионной системы сообществ, сформировавшихся после вырубки гемибореальных светлохвойных травяных лесов ассоциации *Vupleuro–Pinetum*, исследования процессов дивергенции и конвергенции сукцессионных серий [21]. Выявлено, что дивергенция происходит в результате снятия влияния эдификаторной роли доминантов и проявления различий увлажнения почв, а также вследствие их обогащения минеральными элементами вследствие сжигания порубочных остатков, при этом тренды изменения видового богатства в ходе восстановительных сукцессий имеют различный характер и зависят от особенностей экотопов [21]. Интересным является исследование сукцессионной системы ассоциации *Stachyo sylvaticae–Tilietum cordatae* на основе принципов флористической классификации. Анализируются особенности восстановительных сукцессий на вырубках при слабом и сильном нарушении напочвенного покрова, а также в культурах ценотически слабого вида *Pinus sylvestris* и ценотически сильного вида *Picea obovata*. Подчеркивается высокий самовосстановительный потенциал сообществ изученной ассоциации [22], при этом доказывается, что разные восстановительно-возрастные стадии относятся к одной ассоциации.

К настоящему времени разработана классификация растительности вырубок и выявлены основные закономерности ее формирования в ходе восстановительных сукцессий на месте вырубленных лесов классов *Quercu–Fagetea*, *Brachypodio–Betuletea*, *Vaccinio–Piceetea* и *Asaro–Abietetea* [45]. Причем в отличие от классификации вырубок И.С. Мелехова [19, 24], которая разработана на примере достаточно простых северных фитоценозов, в данной публикации анализируются вырубки со сложной структурой и динамикой, убедительно показаны сильные стороны флористического анализа для экологических оценок и классификации. В генетической лесной типологии вырубки объединены в один тип с исходным типом леса, т. е. сохраняется связь с коренным фитоценозом. Для сравнения, в синтаксономии Брауна-Бланке вырубки относятся не только к самостоятельным ассоциациям, но и к классам. При описании производных сообществ в генетической лесной типологии указывается коренной тип леса, производным от которого является исследуемый фитоценоз. Также фиксируется степень его трансформации (условно-коренной, коротко-, длительно- или устойчиво-производный), что является сильной стороной генетической лесной типологии по сравнению с подходом Брауна-Бланке. В целом формирование прогнозов по лесовосстановлению и возрастной динамике не является задачей эколого-флористической классификации, а само направление учета динамики растительности в этой классификации находится в стадии активной разработки.

Учет влияния антропогенных факторов. Учет антропогенных трансформаций в эколого-флористических классификациях возможен, т. к. анализ видового состава позволяет выявить исчезновения и инвазии видов и тем самым оценить антропогенное воздействие [51, 52, 64]. Результатов такого анализа достаточно много, например: оценка синантропизации лесов Республики Башкортостан [1], выявление факторов, обуславливающих изменение видового состава растений лесов [81], моделирование функций отклика растительных сообществ на действие внешних факторов, как природных, так и антропогенных [47, 48]. Тем не менее в лесотипологических исследованиях неоднократно отмечается, что внешние воздействия, в т. ч. антропогенные, в первую очередь приводят к изменению продуктивности (не только древостоя, но и подчиненных ярусов) и нарушениям процессов естественного возобновления растений, что непосредственно влияет на дигрессивно-демутационные смены фитоценозов [35, 37, 74]. Причем это может происходить на фоне еще стабильного флористического состава и выражаться в изменении соотношений видов и изменении ранговых распределений, что нельзя обнаружить, опираясь на глазомерное описание растительности в терминах обилия видов при использовании подхода Брауна-Бланке [14, 67]. Кроме того, смена флористического состава может выступать в качестве механизма адаптации растительных сообществ для сохранения продуктивности и функционирования [15, 68]. Поэтому важно оценивать трансформацию не только флористического состава, но и продуктивности. В синтаксономии Брауна-Бланке она не принимается во внимание, в то время как в отечественных лесных типологиях является одним из основных критериев.

Уровень внедрения. Подход Брауна-Бланке благодаря универсальности, развитой методологии, гибкости классификационных критериев и четкой системе номенклатуры приобрел большую популярность и используется в странах Европы и Северной Америки, а также в России и Японии. С целью создания всемирной базы данных геоботанических описаний разработан и широко применяется программный комплекс Turboveg. К настоящему времени уже составлено множество национальных и региональных баз данных, которые включают миллионы геоботанических описаний, доступных в Turboveg, и послужили основой для национальных и международных классификационных обзоров и научных исследований [64, 83]. Область применения эколого-флористической классификации – инвентаризация и систематизация биоразнообразия растительных сообществ с целью их сохранения и изучения, включая исследование биоклиматических закономерностей, оценку природоохранной значимости растительных сообществ [28, 32]. Для лесной типологии эколого-флористическая классификация представляет определенный интерес, есть многочисленные примеры ее успешного использования в европейских [77], североамериканских [72, 73, 79] и российских [10, 12, 13, 41] лесных типологиях.

В европейских классификациях подход Брауна-Бланке реализован в классификации фитоценологических альянсов, на основе которой была создана европейская классификация растительности EVS, и является связующим звеном между классификацией местообитаний EUNIS и международными научными экологическими исследованиями, использующими подход Брауна-Бланке [77].

При этом проводится детальный экологический анализ, учет не только состава и продуктивности древостоя, но и уровня биоразнообразия в типе леса, что делает классификацию более полезной для научных исследований и охраны природы.

В североамериканских лесных типологиях эколого-флористический подход наиболее полно реализован в биогеоклиматической классификации ВЕС, разработанной В.Й. Краиной [79] для Британской Колумбии (Канада). Основной единицей ВЕС является растительная ассоциация в понимании Брауна-Бланке, точнее ее кульминационная стадия развития (климакс), которая диагностирует биогеоклиматическую подзону. Ассоциации (в т. ч. антропогенно нарушенные и трансформированные) получают названия на основе видов растений, характерных для климаксовой стадии, что позволяет сохранить в классификации генетическую связь между коренными и производными фитоценозами. Биоклиматическая классификация нашла широкое применение в сфере землепользования и в настоящее время выступает в качестве общей основы для обширного спектра приложений в области управления земельными ресурсами, охраны природы и научных исследований в Британской Колумбии [72, 73].

В Российской Федерации подход Брауна-Бланке также привлекает внимание лесных типологов. Небольшой, но достаточно емкий обзор использования эколого-флористического подхода для классификации лесной растительности приводит Л.Б. Заугольнова [10]. К этому следует добавить, что с позиций И.С. Мелехова, В.Н. Сукачева, Б.П. Колесникова и Дж. Брауна-Бланке был проведен синтез классификаций растительности динамичных по составу и структуре фитоценозов вырубок в еловых лесах южной тайги [40]. Типология вырубок И.С. Мелехова хорошо зарекомендовала себя в северных районах, но использование ее принципов при характеристике южно-таежных, хвойно-широколиственных и широколиственных лесов имеет ряд проблем. Для их решения и совершенствования классификационных схем в настоящее время привлекаются методы экологического анализа, разработанные в т. ч. в рамках эколого-флористического подхода [14].

Особо следует отметить определитель типов леса Европейской России, который находится в открытом доступе и удобен для практического применения [12]. Определитель основан на большом фактическом материале, объединенном в базу FORUS. В нем представлены типологическая схема основных синтаксонов, ключи для выделения секций и подсекций, а также продромусы синтаксонов в пределах ботанико-географических зон, характеристики типов леса с указанием ассоциации по Брауну-Бланке, справочники диагностических видов. Использование эколого-флористической классификации помогает установить наиболее крупные реперы, облегчающие отнесение древостоев к типам леса и их группам [12]. Данный определитель можно считать удачной реализацией комплексного подхода к классификации растительности на основе опыта отечественных лесных типологий и эколого-флористической классификации.

Выводы

1. К преимуществам классификации Брауна-Бланке можно отнести ее универсальность, развитую методологию, гибкость классификационных критериев и продуманную номенклатуру. Для использования классификации разработан программный комплекс Turboveg, позволяющий вводить, хранить и обрабатывать данные о растительности.

2. Подход Брауна-Бланке в настоящее время используется в ряде современных лесных типологий разных стран.

3. Первоначально для выделения синтаксонов в эколого-флористической классификации использовались только признаки растительности. Сегодня обязательным становится учет климатических факторов, а при выделении синтаксонов и формировании картографических представлений начинают сочетаться биогеография и оценка факторов, которые влияют на структуру растительности.

4. Отражение сукцессионной динамики в синтаксономических единицах – актуальная задача эколого-флористического подхода, как и отечественных лесных типологий.

5. Учет антропогенных трансформаций в эколого-флористической классификации возможен, и данное направление активно разрабатывается. Существует ряд успешных примеров оценки синантропизации лесов и моделирования функций отклика растительных сообществ на действие внешних факторов, в т. ч. антропогенных.

6. При экологическом анализе структуры лесной растительности в рамках эколого-флористического подхода, как и в лесных типологиях, получают распространение многомерные методы анализа данных – DCA, CCA, PCA с наложением на ординационные диаграммы векторов, характеризующих среду обитания и антропогенные факторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абрамова Л.М., Мартыненко В.Б. Экологическая оценка уровня синантропизации лесов Республики Башкортостан // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биол. 2006. Т. 111, № 2. С. 97–103.

Abramova L.M., Martynenko V.B. Ecological Assessment of the Level of Synanthropism in Forests of the Republic of Bashkortostan. *Byulliten' Moskovskogo obschestva ispytatelej prirody. Otdel biologicheskij* = Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series, 2006, vol. 111, no. 2, pp. 97–103. (In Russ.).

2. Боч М.С., Смагин В.А. Флора и растительность болот Северо-Запада России и принципы их охраны. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 224 с. (Тр. Ботан. ин-та им. В.Л. Комарова РАН; Вып. 7).

Boch M.S., Smagin V.A. *Flora and Vegetation of the Mires of the North-West of Russia and the Principles of Their Protection*. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 224 p. (In Russ.).

3. Булохов А.Д., Соломещ А.И. Эколого-флористическая классификация лесов Южного Нечерноземья России. Брянск: БГУ, 2003. 359 с.

Bulokhov A.D., Solomeshch A.I. *Syntaxonomy of Forests of Russian South Nechernosemie*. Bryansk, Bryansk State University Publ., 2003. 359 p. (In Russ.).

4. Булохов А.Д., Харин А.В. Растительный покров Брянска и его пригородной зоны (синтаксономия и мониторинг) / под ред. Л.М. Ахромеева. Брянск: БГУ, 2008. 311 с.

Bulokhov A.D., Kharin A.V. *The Vegetation Cover of Bryansk and its Suburban Zone (Syntaxonomy and Monitoring)*. Ed. by L.M. Akhromeeva. Bryansk, Bryansk State University Publ., 2008. 311 p. (In Russ.).

5. Воробьев Д.В., Остапенко Б.Ф. Лесная типология и ее применение. Лекция 1. Харьков: ХСХИ, 1977. 53 с.

Vorob'ev D.V., Ostapenko B.F. *Forest Typology and its Application: in 5 Lectures*. Lecture 1. Kharkiv, Kharkiv Agricultural Institute Publ., 1977. 53 p. (In Russ.).

6. Голуб В.Б., Лысенко Т.М., Рухленко И.А., Карпов Д.Н. Внутриконтинентальные галофитные сообщества с преобладанием гемикриптофитов в СНГ и Монголии // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биол. 2001. Т. 106, № 1. С. 69–75.

Golub V.B., Lysenko T.M., Rukhlenko I.A., Karpov D.N. Intracontinental Halophytic Communities with a Predominance of Hemicryptophytes in the CIS and Mongolia. *Byulliten' Moskovskogo obschestva ispytatelej prirody. Otdel biologicheskij* = Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series, 2001, vol. 106, no. 1, pp. 69–75. (In Russ.).

7. Ермаков Н.Б. Высшие единицы сосновых лесов России в связи с общей концепцией классификации растительности Северной Евразии // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2020. № 4(157). С. 94–113.

Ermakov N.B. The Higher Units of Pine Forests of Russia in Connection with the General Concept of Vegetation Classification of Northern Eurasia. *Biologiya rastenij i sadovodstvo: teoriya, innovatsii* = Plant Biology and Horticulture: Theory, Innovation, 2020, no. 4(157), pp. 94–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.36305/2712-7788-2020-4-157-94-113>

8. Ермаков Н.Б., Абдурахманова З.И., Потапенко И.Л. К проблеме синтаксономии сосновых лесов (*Pinus sylvestris* var. *hamata*) с участием бореальных флористических элементов в Дагестане (Северный Кавказ) // Turczaninowia. 2019. Т. 22, № 4. С. 154–171.

Ermakov N.B., Abdurakhmanova Z.I., Potapenko I.L. To the Problem of Syntaxonomy of Pine Forests (*Pinus sylvestris* var. *hamata*) with the Participation of Boreal Floristic Elements in Dagestan (North Caucasus). *Turczaninowia*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 154–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.16>

9. Ермаков Н.Б., Королюк А.Ю., Лащинский Н.Н. Флористическая классификация мезофильных травяных лесов Южной Сибири. Новосибирск, 1991. 96 с.

Ermakov N.B., Korolyuk A.Yu., Lashchinskiy N.N. *Floristic Classification of Mesophilic Herbaceous Forests of Southern Siberia*. Novosibirsk, 1991. 96 p. (In Russ.).

10. Заугольнова Л.Б. Подходы к оценке типологического разнообразия лесного покрова // Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / отв. ред. А.С. Исаев. М.: Наука, 2008. С. 36–58.

Zaugolnova L.B. Approaches to the Assessment of the Biological Diversity of the Forest Cover. *Monitoring of the Biological Diversity of the Forests of Russia: Methodology and Methods*. Ed.-in-Chief A.S. Isaev. Moscow, Nauka Publ., 2008, pp. 36–58. (In Russ.).

11. Заугольнова Л.Б., Браславская Т.Ю. Анализ ассоциаций мезофитных широколиственных лесов в центре Европейской России // Растительность России. 2003. № 4. С. 3–28.

Zaugolnova L.B., Braslavskaya T.Yu. The Analysis of Mesophytic Broad-Leaved Forest Associations in the Center of European Russia. *Rastitel'nost' Rossii* = Vegetation of Russia, 2003, no. 4, pp. 3–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/10.31111/vegus/2003.04.3>

12. Заугольнова Л.Б., Мартыненко В.Б. Определитель типов леса Европейской России. Режим доступа: <http://cepl.rssi.ru/bio/forest/index.htm> (дата обращения: 17.04.21).

Zaugolnova L.B., Martynenko V.B. The Guide to Forest Types of European Russia. (In Russ.).

13. Золотова Е.С. Лесотипологические особенности растительности и почв Зауральской холмисто-предгорной провинции: дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2013. 209 с.

Zolotova E.S. *Forest Typological Features of Vegetation and Soils of the Zauralskiy Hilly-Foothill Province*: Cand. Biol. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2013. 209 p. (In Russ.).

14. Иванова Н.С. Лесотипологические особенности биоразнообразия и восстановительно-возрастной динамики растительности горных лесов Южного и Среднего Урала: дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2019. 304 с.

Ivanova N.S. *Forest Typological Features of Biodiversity and Restoration-Age Dynamics of Vegetation in Mountain Forests of the Southern and Middle Urals*: Doc. Biol. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2019. 304 p. (In Russ.).

15. Иванова Н.С., Золотова Е.С. Адаптация лесных экосистем к фактору увлажнения в горах Среднего Урала // Уч. зап. Казан. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2019. Т. 161, кн. 2. С. 293–306.

Ivanova N.S., Zolotova E.S. Adaptation of Forest Ecosystems to the Humidity Factor in the Middle Urals. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2019, vol. 161, book 2, pp. 293–306. (In Russ.). <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.293-306>

16. Ивашкевич Б.А. Типы лесов Приморья и их экономическое значение // Производительные Силы Дальнего Востока. Вып. 3: Растительный мир. Хабаровск; Владивосток: Кн. дело, 1927. С. 3–20.

Ivashkevich B.A. Types of Forests in Primorye and Their Economic Significance. *Productive Forces of the Far East. Iss. 3: The Plant World*. Khabarovsk, Vladivostok, Knizhnoye delo Publ., 1927, pp. 3–20. (In Russ.).

17. Колесников Б.П. Генетическая классификация типов леса и ее задачи на Урале // Вопросы классификации растительности: сб. ст. / отв. ред. проф. П.Л. Горчаковский. Свердловск, 1961. С. 47–59. (Тр. Ин-та биологии / АН СССР. Урал. фил.; Вып. 27).

Kolesnikov B.P. Genetic Classification of Forest Types and its Tasks in the Urals. *Vegetation Classification Issues: Collected Works (Proceedings of the Institute of Biology of the USSR Academy of Sciences)*. Ed.-in-Chief P.L. Gorchakovskiy. Sverdlovsk, 1961, iss. 27, pp. 47–59. (In Russ.).

18. Колесников Б.П. Генетический этап в лесной типологии и его задачи // Лесоведение. 1974. № 2. С. 3–20.

Kolesnikov B.P. The Genetic Stage in Forest Typology and its Tasks. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1974, no. 2, pp. 3–20. (In Russ.).

19. Крышень А.М. Растительные сообщества вырубок: структура, динамика и классификация (на примере Карелии): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Петрозаводск, 2005. 42 с.

Kryshen' A.M. *Plant Communities of Cuttings: Structure, Dynamics and Classification (by the Example of Karelia)*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Petrozavodsk, 2005. 42 p. (In Russ.).

20. Кузьменко Е.И., Смолоногов Е.П. Лесные экосистемы средней и южной тайги Западно-Сибирской равнины (структура и пространственно-временная динамика). Новосибирск: СО РАН, 2000. 218 с.

Kuz'menko E.I., Smolonogov E.P. *Forest Ecosystems of the Middle and Southern Taiga of the West Siberian Plain (Structure and Spatiotemporal Dynamics)*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2000. 218 p. (In Russ.).

21. Мартыненко В.Б., Широких П.С., Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Синтаксономический анализ восстановительных сукцессий после вырубки светлохвойных лесов Южно-Уральского региона // Журн. общ. биологии. 2014. Т. 75, № 6. С. 478–490.

Martynenko V.B., Shirokikh P.S., Mirkin B.M., Naumova L.G. Syntaxonomic Analysis of Restorative Successions after Cutting Down Light Coniferous Forests of South Ural Region. *Zhurnal obshchej biologii = Biology Bulletin Reviews*, 2014, vol. 75, no. 6, pp. 478–490. (In Russ.).

22. Мартыненко В.Б., Широких П.С., Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Баишева Э.З., Мулдашев А.А. Синтаксономический анализ влияния инициальной стадии на вторичную автогенную сукцессию широколиственного леса // Журн. общ. биологии. 2016. Т. 77, № 4. С. 303–313.

Martynenko V.B., Shirokikh P.S., Mirkin B.M., Naumova L.G., Bayisheva E.Z., Muldashev A.A. A Syntaxonomic Analysis of the Initial Stage Effect on Secondary Autogenous

Succession of Broad-Leaved Forest. *Zhurnal obshchej biologii* = Biology Bulletin Reviews, 2016, vol. 77, no. 4, pp. 303–313. (In Russ.).

23. Матвеева Н.В. Растительность южной части острова Большевик (архипелаг Северная Земля) // Растительность России. 2006. № 8. С. 3–87.

Matveyeva N.V. Vegetation of the Southern Part of Bolshevik Island (Severnaya Zemlya Archipelago). *Rastitel'nost' Rossii* = Vegetation of Russia, 2006, no. 8, pp. 3–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/vegrus/2006.08.3>

24. Мелехов И.С. Основы типологии вырубок // Основы типологии вырубок и ее значение в лесном хозяйстве: сб. ст. / под ред. И.С. Мелехова. Архангельск, 1959. С. 5–34.

Melekhov I.S. Basics of Felling Typology. *Basics of Felling Typology and its Significance in Forestry*. Arkhangelsk, 1959, pp. 5–34. (In Russ.).

25. Мигунова Е.С. Лесотипологическая классификационная система как основа единой экологической классификации и факторов природной среды // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 6. С. 173–182.

Migunova E.S. Forest Typological Classification System as Basis of Uniform Ecological Classification and Environmental Factors. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 6, pp. 173–182. (In Russ.).

26. Мигунова Е.С. Лесная типология Г.Ф. Морозова – А.А. Крюденера – П.С. Погребняка – теоретическая основа лесоводства // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 5. С. 52–63.

Migunova E.S. Forest Typology by G.F. Morozov – A.A. Kryudener – P.S. Pogrebnyak is Theoretical Basis of Forestry. *Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 52–63. (In Russ.).

27. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Фиторазнообразие: факторы формирования, синтаксономия, система охраны // Аспекты биоразнообразия / сост. И.Я. Павлинов. Ч. 2. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. С. 456–477. (Сб. тр. Зоол. музея МГУ; Т. 54).

Mirkin B.M., Naumova L.G. Phytodiversity: Formation Factors, Syntaxonomy, Protection System. *Aspects of Biodiversity. Part 2 (Coll. of works of the MSU Zoological Museum)*. Comp. by I.Ya. Pavlinov. Moscow, KMK Publ. House, 2016, vol. 54, pp. 456–477. (In Russ.).

28. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Динамика активности синтаксономических центров России и процессы их интеграции // Растительность России. 2017. № 31. С. 119–124.

Mirkin B.M., Naumova L.G. Dynamics of Activity of Syntaxonomic Centres of Russia and Processes of Their Integration. *Rastitel'nost' Rossii* = Vegetation of Russia, 2017, no. 31, pp. 119–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/vegrus/2017.31.119>

29. Морозов Г.Ф. Учение о лесе. Л.; М.: Гос. изд-во, 1925. 367 с.

Morozov G.F. *The Doctrine of Forest Types*. Leningrad, Moscow, State Publ. House, 1925. 367 p. (In Russ.).

30. Морозов Г.Ф. Учение о типах насаждений. М.; Л.: ОГИЗ, Гос. изд-во с.-х. и колхоз.-кооп. лит., 1931. 421 с.

Morozov G.F. *The Doctrine of the Types of Plantings*. Moscow, Leningrad, State Publ. House of Agric. and Coll. Farm-Coop. Literature, 1931. 421 p.

31. Морозова О.В., Заугольнова Л.Б., Исаева Л.Г., Костина В.А. Классификация бореальных лесов севера Европейской России. I. Олиготрофные хвойные леса // Растительность России. 2008. № 13. С. 61–81.

Morozova O.V., Zaugolnova L.B., Isaeva L.G., Kostina V.A. Classification of Boreal Forests in the North of European Russia. I. Oligotrophic Coniferous Forests. *Rastitel'nost' Rossii* = Vegetation of Russia, 2008, no. 13, pp. 61–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/vegrus/2008.13.61>

32. Плугатарь Ю.В., Ермаков Н.Б., Крестов П.В., Матвеева Н.В., Мартыненко В.Б., Голуб В.Б., Нешатаева В.Ю., Нешатаев В.Ю., Аненхонов О.А., Лавриненко И.А., Лавриненко О.В., Чепинога В.В., Синельникова Н.В., Морозова О.В., Белоновская Е.А., Тишков А.А., Черненко Т.В., Кривобоков Л.В., Телятников М.Ю., Лапина Е.Д.,

Онипченко В.Г., Королева Н.Е., Черосов М.М., Семенищенков Ю.А., Абрамова Л.М., Лысенко Т.М., Полякова М.А. Концепция классификации растительности России как отражение современных задач фитоценологии // Растительность России. 2020. № 38. С. 3–12.

Plugatar Yu.V., Ermakov N.B., Krestov P.V., Matveyeva N.V., Martynenko V.B., Golub V.B., Neshataeva V.Yu., Neshataev V.Yu., Anenkhonov O.A., Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V., Chepinoga V.V., Sinelnikova N.V., Morozova O.V., Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Chernenkova T.V., Krivobokov L.V., Telyatnikov M.Yu., Lapshina E.D., Onipchenko V.G., Koroleva N.E., Cherosov M.M., Semenushchenkov Yu.A., Abramova L.M., Lysenko T.M., Polyakova M.A. The Concept of Vegetation Classification of Russia as an Image of Contemporary Tasks of Phytocenology. *Rastitel'nost' Rossii = Vegetation of Russia*, 2020, no. 38, pp. 3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/vegrus/2020.38.3>

33. *Погребняк П.С.* Основы лесной типологии. Киев: АН УССР, 1955. 456 с.

Pogrebnyak P.S. *The Basics of Forest Typology*. Kiev, Ukrainian SSR Academy of Sciences Publ., 1955. 456 p. (In Russ.).

34. *Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А.* Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз, 1956. 472 с.

Ramenskiy L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipin N.A. *Ecological Assessment of Forage Lands by Vegetation Cover*. Moscow, Selkhozgiz Publ., 1956. 472 p. (In Russ.).

35. *Санников С.Н.* Эколого-генетическая классификация типов леса на основе экодинамических рядов развития биогеоценозов // Сиб. лесн. журн. 2019. № 1. С. 3–15.

Sannikov S.N. Ecologic and Genetic Classification of Forest Types Based on Ecologic and Genetic Series of Development of Biogeocenoses. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2019, no. 1, pp. 3–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20190101>

36. *Смирнова О.В., Заугольнова Л.Б., Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Торопова Н.А.* Популяционные и фитоценотические методы анализа биоразнообразия растительного покрова // Сохранение и восстановление биоразнообразия. М.: Науч. и учеб.-метод. центр, 2002. С. 145–194.

Smirnova O.V., Zaugolnova L.B., Khanina L.G., Bobrovskiy M.V., Toropova N.A. Population and Phytocenotic Methods for Analysis of Biodiversity of Vegetation Cover. *Conservation and Restoration of Biodiversity*. Moscow, Scientific and educational-methodological centre Publ., 2002, pp. 145–194. (In Russ.).

37. *Смолоногов Е.П.* Эколого-географическая дифференциация и динамика кедровых лесов Урала и Западно-Сибирской равнины (эколого-лесоводственные основы оптимизации хозяйства). Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 288 с.

Smolonogov E.P. *Ecological and Geographical Differentiation and Dynamics of Pine Forests in the Urals and the West Siberian Plain (Ecological and Forestry Foundations for Economic Optimization)*. Sverdlovsk, Ural Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).

38. *Смолоногов Е.П.* Основные положения генетического подхода при построении лесотипологических классификаций // Экология. 1998. № 4. С. 256–261.

Smolonogov E.P. Main Principles of the Genetic Approach to the Typological Classification of Forests. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*, 1998, no. 4, pp. 256–261. (In Russ.).

39. *Сукачев В.Н.* Избр. тр.: в 3 т. Т. 1. Основы лесной типологии и лесной биогеоценологии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. 417 с.

Sukachev V.N. *Selected Works: in 3 vol. Vol. 1. Fundamentals of Forest Typology and Forest Biogeocenology*. Leningrad, Nauka Publ. (Leningrad Department), 1972. 417 p. (In Russ.).

40. Уланова Н.Г. Восстановительная динамика растительности сплошных вырубок и массовых ветровалов в ельниках Южной тайги (на примере европейской части России): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2006. 46 с.

Ulanova N.G. *Restorative Dynamics of Vegetation in Clear-Cuts and Massive Wind-falls in the Spruce Forests of the Southern Taiga (by the example of the European Part of Russia)*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2006. 46 p. (In Russ.).

41. Уланова Н.Г. Синтез классификации растительности вырубков в еловых лесах южной тайги с позиций И.С. Мелехова, В.Н. Сукачева, Б.П. Колесникова и Ж. Браун-Бланке // Генетическая типология, динамика и география лесов России: материалы Всерос. науч. конф. (с междунар. участием), посвящ. 100-летию со дня рождения Б.П. Колесникова. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. С. 72–75.

Ulanova N.G. Synthesis of the Classification of Vegetation of Cleared Areas in the Spruce Forests of the Southern Taiga from the Perspectives of I.S. Melekhov, V.N. Sukachev, B.P. Kolesnikov and Zh. Brown-Blanke. *Genetic Typology, Dynamics and Geography of Russian Forests: Materials of the All-Russian Scientific Conference (with International Participation) Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of B.P. Kolesnikov*. Yekaterinburg, Ural Branch of the RAS, 2009, pp. 72–75. (In Russ.).

42. Фильрозе Е.М. Схема генетической классификации типов леса тайги восточного макросклона Южного Урала и северной лесостепи восточно-уральского пене-плена // Типы и динамика лесов Урала и Зауралья. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1967. С. 119–155. (Тр. Ин-та экологии растений и животных; Вып. 53).

Fil'roze E.M. The Scheme of Genetic Classification of Taiga Forest Types of the Eastern Macroslope of the Southern Urals and Northern Forest-Steppe of the East Ural Peneplain. *Types and Dynamics of Forests in the Urals and Trans-Urals (Proceedings of the Institute of Plant and Animal Ecology, iss. 53)*. Sverdlovsk, Ural Science Centre of the USSR Academy of Sciences, 1967, pp. 119–155. (In Russ.).

43. Фильрозе Е.М. Схема генетической классификации типов леса Южного Урала // Эколого-географические и генетические принципы изучения лесов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 53–60.

Fil'roze E.M. The Scheme of Genetic Classification of Forest Types of the Southern Urals. *Ecological-Geographical and Genetic Principles of Forest Research*. Sverdlovsk, Ural Science Centre of the USSR Academy of Sciences, 1983, pp. 53–60. (In Russ.).

44. Холод С.С. Классификация растительности острова Врангеля // Растительность России. 2007. № 11. С. 3–135.

Kholod S.S. Classification of Wrangel Island Vegetation. *Rastitel'nost' Rossii = Vegetation of Russia*, 2007, no. 11, pp. 3–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/vegus/2007.11.3>

45. Широких П.С., Мартыненко В.Б., Баишева Э.З., Бикбаев И.Г. Динамика растительности на вырубках Южно-Уральского региона: основные итоги исследований Уфимской геоботанической школы // Фиторазнообразие Вост. Европы. 2018. Т. 12, № 3. С. 17–30.

Shirokikh P.S., Martynenko V.B., Baisheva E.Z., Bikbaev I.G. Vegetation Dynamics on Felling in the South Ural Region: Main Results of Studies of the Ufa Geobotanical School. *Fitoraznoobrazie Vostochnoy Evropy = Phytodiversity of Eastern Europe*, 2018, vol. XII, no. 3, pp. 17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2072-8816-2018-10023>

46. Allegrezza M., Montecchiari S., Ottaviani C., Pelliccia V., Tesei G. Syntaxonomy of the *Robiniapseudoacacia* Communities in the Central Peri-Adriatic Sector of the Italian Peninsula. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 2019, vol. 153, no. 4, pp. 616–623. <https://doi.org/10.1080/11263504.2019.1610108>

47. Anand M., Kadmon R. Community-Level Analysis of Spatiotemporal Plant Dynamics. *Écoscience*, 2000, vol. 7, pp. 101–110. <https://doi.org/10.1080/11956860.2000.11682578>

48. Andreucci F., Biondi E., Feoli E., Zuccarello V. Modeling Environmental Responses of Plant Associations by Fuzzy Set Theory. *Community Ecology*, 2000, vol. 1, iss. 1, pp. 73–80. <https://doi.org/10.1556/ComEc.1.2000.1.10>
49. Bailey R.G. Identifying Ecoregion Boundaries. *Environmental Management*, 2004, vol. 34, pp. 14–26. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0163-6>
50. Biondi E., Feoli E., Zuccarello V. Modelling Environmental Responses of Plant Associations: A Review of Some Critical Concepts in Vegetation Study. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, vol. 23, iss. 2, pp. 149–156. <https://doi.org/10.1080/07352680490433277>
51. Biondi E. Phytosociology Today: Methodological and Conceptual Evolution. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 2011, vol. 145, suppl. 1, pp. 19–29. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.602748>
52. Blasi C., Frondoni R. Modern Perspectives for Plant Sociology: The Case of Ecological Land Classification and the Ecoregions of Italy. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 2011, vol. 145, suppl. 1, pp. 30–37. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.602747>
53. Braun-Blanquet J. *Pflanzensoziologie*. Springer Vienna, 1964. 866 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>
54. Capelo J. Evidence of a Unique Association Between Single Forest Vegetation-Types and Seral Sequences: Praise for the Concept of ‘Vegetation Series’. *Geographical Changes in Vegetation and Plant Functional Types. Geobotany Studies*. Ed. by A. Geller, K. Fujiwara, F. Pedrotti. Springer, Cham, 2018, pp. 3–18. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68738-4_1
55. Capotorti G., Guida D., Siervo V., Smiraglia D., Blasi C. Ecological Classification of Land and Conservation of Biodiversity at the National Level: the Case of Italy. *Biological Conservation*, 2012, vol. 147, iss. 1, pp. 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.028>
56. Code of Phytosociological Nomenclature. *Vegetatio*, 1986, vol. 67, pp. 145–195. <https://doi.org/10.1007/BF00044842>
57. Dengler J., Jansen F., Glöckler F., Peet R.K., Cáceres De M., Chytrý M., Ewald J., Oldeland J., Lopez-Gonzalez G., Finckh M., Mucina L., Rodwell J.S., Schaminée J.H.J., Spencer N. The Global Index of Vegetation-Plot Databases (GIVD): A New Resource for Vegetation Science. *Journal of Vegetation Science*, 2011, vol. 22, iss. 4, pp. 582–597. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01265.x>
58. Ermakov N., Morozova O. Syntaxonomical Survey of Boreal Oligotrophic Pine Forests in Northern Europe and Western Siberia. *Applied Vegetation Science*, 2011, vol. 14, pp. 524–536. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2011.01155.x>
59. Ermakov N., Cherosov M., Gogoleva P. Classification of Ultracontinental Boreal Forests in Central Yakutia. *Folia Geobotanica*, 2002, vol. 37, no. 4, pp. 419–440. <https://doi.org/10.1007/BF02803256>
60. Fomin V.V., Zalesov S.V., Popov A.S., Mikhailovich A.P. Historical Avenues of Research in Russian Forest Typology: Ecological, Phytocoenotic, Genetic, and Dynamic Classifications. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 47, no. 7, pp. 849–860. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0011>
61. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic Forest Typology as a Scientific and Methodological Basis for Environmental Studies and Forest Management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 609, art. no. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012044>
62. Fomin V., Mikhailovich A., Zalesov S., Popov A., Terekhov G. Development of Ideas within the Framework of the Genetic Approach to the Classification of Forest Types. *Baltic Forestry*, 2021, vol. 27, no. 1, art. no. 466. <https://doi.org/10.46490/BF466>

63. Golub V.B., Mirkin B.M. Grasslands of the Lower Volga Valley. *Folia Geobotanica & Phytotaxonomica*, 1986, vol. 21, pp. 337–395. <https://doi.org/10.1007/BF02853244>
64. Ibáñez J.J., Pérez-Gómez R., Ganis P., Feoli E. The Use of Vegetation Series to Assess α and β Vegetation Diversity and Their Relationships with Geodiversity in the Province of Almeria (Spain) with Watersheds as Operational Geographic Units. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 2016, vol. 150, iss. 6, pp. 1395–1407. <https://doi.org/10.1080/11263504.2016.1165755>
65. Ingegnoli V. *Landscape Ecology: A Widening Foundation*. Heidelberg, Springer Berlin, 2002. 357 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04691-3>
66. Ivanova N.S., Zolotova E.S. Development of Forest Typology in Russia. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 298–303. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2014.00572.7>
67. Ivanova N., Petrova I. Species Abundance Distributions: Investigation of Adaptation Mechanisms of Plant Communities. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 254, art. no. 02003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125402003>
68. Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. Influence of Soil Moisture Regime on the Species Diversity and Biomass of the Herb Layer of Pine Forests in the Ural Mountains. *Ecological Questions*, 2021, vol. 32, no. 2, pp. 27–38. <https://doi.org/10.12775/EQ.2021.011>
69. Jalilian A.M., Shayesteh K., Danekar A., Salmanmahiny A. A New Ecosystem-Based Land Classification of Iran for Conservation Goals. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192, art. no. 182. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8145-1>
70. Krivobokov L., Zverev A., Mukhortova L., Sergeeva O., Rosbakh S. Typological Diversity and Ecological Features of the Middle Taiga Forests of Central Siberia. *BIO Web of Conferences*, 2020, vol. 24, art. no. 00044. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202400044>
71. Kusbach A., Friedl M., Zouhar V., Mikita T., Šebesta J. Assessing Forest Classification in a Landscape-Level Framework: An Example from Central European Forests. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 12, art. no. 461. <https://doi.org/10.3390/f8120461>
72. MacKenzie W.H., Mahony C.R. An Ecological Approach to Climate Change-Informed Tree Species Selection for Reforestation. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 481, art. no. 118705. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118705>
73. MacKinnon A., Meidinger D., Klinka K. Use of the Biogeoclimatic Ecosystem Classification System in British Columbia. *The Forestry Chronicle*, 1992, vol. 68, pp. 100–120. <https://doi.org/10.5558/tfc68100-1>
74. Maiti R., González Rodríguez H., Ivanova N.S. *Autoecology and Ecophysiology of Woody Shrubs and Trees: Concepts and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 355 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
75. Miyawaki A. Phytosociology in Japan. The Past, Present and Future from the Footsteps of One Phytosociologist. *Braun-Blanquetia*, 2010, vol. 46, pp. 55–58.
76. Mirkin B.M., Naumova L.G., Martynenko V.B., Shirokikh P.S. Contribution of the Braun-Blanquet Syntaxonomy to Research on Successions of Plant Communities. *Russian Journal of Ecology*, 2015, vol. 46, no. 4, pp. 303–308. <https://doi.org/10.1134/S106741361504013X>
77. Mucina L. Classification of Vegetation: Past, Present and Future. *Journal of Vegetation Science*, 1997, vol. 8, iss. 6, pp. 751–760. <https://doi.org/10.2307/3237019>
78. Mucina L., Bültmann H., Dierßen K., Theurillat J.-P., Raus T., Čarni A., Šumberová K., Willner W., Dengler J., Gavilán García R., Chytrý M., Hájek M., Pietro Di R., Iakushenko D., Pallas J., Daniëls F.J.A., Bergmeier E., Guerra A.S., Ermakov N., Valachovič M., Schaminée J.H.J., Lysenko T., Didukh Y.P., Pignatti S., Rodwell J.S., Capelo J., Weber H.E., Solomeshch A., Dimopoulos P., Aguiar C., Hennekens S.M., Tichý L. Vegetation of Europe: Hierarchical Floristic Classification System of Vascular Plant, Bryophyte, Li-

chen, and Algal Communities. *Applied Vegetation Science*, 2016, vol. 19, iss. 1, pp. 3–264. <https://doi.org/10.1111/avsc.12257>

79. Pojar J., Klinka K., Meidinger D.V. Biogeoclimatic Ecosystem Classification in British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 1987, vol. 22, iss. 1–2, pp. 119–154. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(87\)90100-9](https://doi.org/10.1016/0378-1127(87)90100-9)

80. Reczyńska K., Pech P., Świerkosz K. Phytosociological Analysis of Natural and Artificial Pine Forests of the Class *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 in the Sudetes and Their Foreland (Bohemian Massif, Central Europe). *Forests*, 2021, vol. 12, no. 1, art. no. 98. <https://doi.org/10.3390/f12010098>

81. Russo G., Pedrotti F., Gafta D. Typology and Synecology of Aspen Woodlands in the Central-Southern Apennines (Italy): New Findings and Synthesis. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2020, vol. 13, iss. 3, pp. 202–208. <https://doi.org/10.3832/ifor3315-013>

82. Sánchez-Mata D. The Phytosociological Approach in North American Studies: Some Considerations on Phytosociological Nomenclature. *Folia Geobotanica & Phytotaxonomica*, 1997, vol. 32, pp. 415–418. <https://doi.org/10.1007/BF02821949>

83. Schaminée J.H.J., Janssen J.A.M., Hennekens S.M., Ozinga W.A. Large Vegetation Databases and Information Systems: New Instruments for Ecological Research, Nature Conservation, and Policy Making. *Plant Biosystems*, 2011, vol. 145, suppl. 1, pp. 85–90. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.602744>

84. Shirokikh P.S., Martynenko V.B., Kunafin A.M. Experience in Syntaxonomic and Ordination Analysis of Progressive Succession in Cutover Areas of Boreal Light Conifer Forests in the Southern Urals. *Russian Journal of Ecology*, 2013, vol. 44, pp. 185–192. <https://doi.org/10.1134/S1067413613030120>

85. Tardella F., Vitanzi A., Sparvoli D., Catorci A. Syntaxonomy and Site Ecology of a Central Italy Forest Landscape. *Hacquetia*, 2011, vol. 10, iss. 1, pp. 5–40. <https://doi.org/10.2478/v10028-011-0001-y>

86. Theurillat J.-P., Willner W., Fernández-González F., Bültmann H., Čarni A., Gigante D., Mucina L., Weber H. International Code of Phytosociological Nomenclature. 4th Edition. *Applied Vegetation Science*, 2021, vol. 24, iss. 1, art. no. e12491. <https://doi.org/10.1111/avsc.12491>

87. Weber H.E., Moravec J., Theurillat J.-P. International Code of Phytosociological Nomenclature. 3rd Edition. *Journal of Vegetation Science*, 2000, vol. 11, iss. 5, pp. 739–768. <https://doi.org/10.2307/3236580>

88. Westhoff V.E., Maarel Der Van E. The Braun–Blanquet Approach. *Classification of Plant Communities*. Ed. by R.H. Whittaker. Dordrecht, Springer, 1978, vol. 5-1, pp. 287–399. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9183-5_9

89. Whittaker R.H. *Communities and Ecosystems*. 2nd ed. New York, Macmillan Publishing Co., 1975. 385 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

Научная статья
УДК 630*165.51
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-68-80

Семенная продуктивность и качество семян *Pinus sylvestris* L. в лесных культурах на крымских яйлах

В.П. Коба¹, д-р биол. наук, проф., зав. лаб.; ResearcherID: [АНН-4819-2022](https://orcid.org/0000-0002-2144-0836),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2144-0836>

И.А. Крестьянишин², зав. отд.; ResearcherID: [AIC-4574-2022](https://orcid.org/0000-0003-2606-2317),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2606-2317>

О.О. Коренькова³, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [АНН-3052-2022](https://orcid.org/0000-0001-6482-7312),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-7312>

¹Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, спуск Никитский, д. 52, г. Ялта, Республика Крым, Россия, 298648; kobavp@mail.ru

²Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым, ул. Кечкетметская, д. 198, г. Симферополь, Россия, 295022; krest.igor@mail.ru

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, ш. Ярославское, д. 26, Москва, Россия, 129337; o.o.korenkova@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.22 / Одобрена после рецензирования 27.09.22 / Принята к печати 29.09.22

Аннотация. Изучены семенная продуктивность и качество семян *Pinus sylvestris* в лесных культурах на крымских яйлах. Дана характеристика динамики биометрических показателей шишек и семян по годам и в связи с особенностями условий произрастания. Выявлены существенные различия качества семян деревьев *P. sylvestris* по уровню энергии прорастания. Показано, что наряду с температурным режимом значительное влияние на результативность процессов репродукции *P. sylvestris* оказывают влажность воздуха и характер выпадения осадков, динамика движения воздушных масс, т. к. успех опыления определяется количеством и качеством пыльцы, достигшей женских репродуктивных структур. На основе анализа погодных явлений и динамики качества семян установлено, что уровень всхожести семян наиболее хорошо отражается интегральным показателем, учитывающим совместное действие нескольких факторов, – индексом сухости. Кроме того, результаты анализа позволили заключить, что с наибольшей вероятностью на эффективность процесса опыления женских шишек *P. sylvestris* в условиях яйлы оказывает влияние количество часов солнечного сияния. Энергия прорастания и всхожесть семян отличаются не только в пределах изученных насаждений, но и в зависимости от года исследования. В лесных культурах Ай-Петринской яйлы в период наблюдений формировались наиболее качественные семена. В 2014 г. в насаждениях с полнотой 0,5 всхожесть семян составила 74,5±2,2 %. Самые низкие уровни энергии прорастания и всхожести семян были отмечены в искусственных насаждениях *P. sylvestris* на Тырке-яйле, в 2012 г. эти показатели здесь составили 15,2±0,7 и 46,2±2,1 % соответственно. В целом развитие генеративной сферы *P. sylvestris* в искусственных насаждениях на крымских яйлах проходит достаточно эффективно, на основании чего сделан вывод о благоприятности условий произрастания на яйлах для реализации начальных этапов онтогенеза вида.

Ключевые слова: яйла, *Pinus sylvestris*, лесные культуры, семенная продуктивность, качество семян, Республика Крым

Для цитирования: Коба В.П., Крестьянишин И.А., Коренькова О.О. Семенная продуктивность и качество семян *Pinus sylvestris* L. в лесных культурах на крымских яйлах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 68–80. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-68-80>

Original article

Seed Production and Seed Quality of *Pinus sylvestris* L. in Forest Plantations on the Crimean Yaylas

Vladimir P. Koba¹, Doctor of Biology, Prof., Lab. Chief; ResearcherID: [AHH-4819-2022](https://orcid.org/0000-0002-2144-0836),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2144-0836>

Igor' A. Krest'yanishin², Head of Department; ResearcherID: [AIC-4574-2022](https://orcid.org/0000-0003-2606-2317),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2606-2317>

Olesya O. Koren'kova³, Candidate of Biology, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [AHH-3052-2022](https://orcid.org/0000-0001-6482-7312), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-7312>

¹Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Center of the RAS, Nikitsky Spusk, 52, Yalta, Republic of Crimea, 298648, Russian Federation; kobavp@mail.ru

²Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Crimea, ul. Kechkemetskaya, 198, Simferopol, Republic of Crimea, 295022, Russian Federation; krest.igor@mail.ru

³National Research University Moscow State University of Civil Engineering, sh. Yaroslavskoe, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; o.o.korenkova@mail.ru

Received on May 24, 2022 / Approved after reviewing on September 27, 2022 / Accepted on September 29, 2022

Abstract. The seed production and quality of *Pinus sylvestris* seeds in forest plantations on the Crimean yaylas has been studied. The dynamics of biometric indicators of cones and seeds by year and in connection with the peculiarities of growing conditions has been characterized. Significant differences in the quality of seeds of *P. sylvestris* trees have been revealed in terms of the level of germination energy. It has been shown that, along with the temperature regime, a significant impact on the effectiveness of *P. sylvestris* reproduction processes is exerted by air humidity and the nature of precipitation, as well as the dynamics of air mass movement, since the success of pollination is determined by the quantity and quality of pollen that has reached the female reproductive structures. Based on the analysis of weather phenomena and the dynamics of seed quality, it has been found that the level of seed germination is best reflected by an integrated index that takes into account the combined effect of several factors – the dryness index. In addition, the results of the analysis allowed us to conclude that the efficiency of the pollination process of female cones of *P. sylvestris* under yayla conditions is most likely influenced by the number of hours of sunshine. The germination energy and seed germination differ not only within the studied plantations, but also depending on the year of study. During the observation period, the forest plantations of the Ai-Petrinskaya Yayla have produced the highest quality seeds. In 2014, in the plantations with a density of 0.5, the seed germination rate was 74.5 ± 2.2 %. The lowest level of germination energy and seed germination has been noted in artificial plantations of *P. sylvestris* on the Tirke Yayla; in 2012, these indicators here amounted to 15.2 ± 0.7 and 46.2 ± 2.1 %, respectively. In general, the development of the generative sphere of *P. sylvestris* in artificial plantations on the Crimean yaylas is quite effective. Based on this, a conclusion has been made that the growing conditions on the yaylas are favourable for the implementation of the initial stages of the ontogenesis of the species.

Keywords: yayla, *Pinus sylvestris*, forest plantations, seed production, seed quality, the Republic of Crimea

For citation: Koba V.P., Krest'yanishin I.A., Koren'kova O.O. Seed Production and Seed Quality of *Pinus sylvestris* L. in Forest Plantations on the Crimean Yaylas. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 4, pp. 68–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-68-80>

Введение

Верхний высотный пояс горного Крыма – это холмистое, закарстованное плоскогорье (яйлы). Леса, произрастающие на этих территориях, выполняют важные водоохранные, почвозащитные и рекреационные функции. Наряду с естественными лесами, искусственно созданные лесные насаждения на яйлах позволяют решать задачи по улучшению водного баланса региона за счет увеличения объема стока горных рек полуострова. В начале XX в. на западных и центральных яйлах А.Ф. Скоробогатым и К.Ф. Левандовским [1] произведены первые посадки лесных культур. К сожалению, до наших дней сохранилась только некоторая часть этих посадок – на Никитской яйле. Самые масштабные посадки лесных культур, основными породами которых выступали сосна обыкновенная и крымская, приходится на Ялтинскую яйлу и датированы 50–60-ми гг. прошлого века [10].

В число критериев оценки качества развития генеративной сферы древесных растений входят уровень семенной продуктивности и жизнеспособность семян. Наиболее остро стоит вопрос изучения эффективности процессов репродукции в искусственных насаждениях [16, 20, 22, 24]. Особый интерес представляет изучение механизмов адаптации видов в зависимости от лимитирующих факторов. Уровень репродуктивных процессов снижается в пессимальных условиях, в частности, страдает развитие женской и мужской генеративной сферы, в результате чего семена формируются некачественными или не образуются вовсе [17, 18, 23]. Кроме того, большое значение приобретает трансформация природной среды в результате глобального изменения климата [15, 19, 25–27]. Поэтому количественные и качественные характеристики семенной продуктивности являются ключевыми показателями уровня оптимальности условий произрастания для различных видов растений.

Цель исследования – определение семенной продуктивности и качества семян *Pinus sylvestris* L. в лесных культурах на крымских яйлах.

Объекты и методы исследования

Для изучения биометрических признаков шишек и качества семян *P. sylvestris* с помощью общепринятых таксационных методов [6] в искусственных насаждениях яйл Крыма закладывали пробные площади размером по 0,5 га. На Ай-Петринской яйле пробные площади были заложены на высоте над уровнем моря 1200–1250 м, на Ялтинской – 1400–1450 м, на Никитской – 1300–1350 м, на Бабуган-яйле – 1450–1500 м, на Тырке-яйле – 1150–1200 м.

Анализ динамики семеношения осуществляли по шкале В.Г. Каппера [2], подсчитывая урожайность шишек в пределах всей площади насаждений. Уровень развития женских генеративных структур оценивали по модельным

деревьям – по 10 с каждой пробной площади. В зимне-весенний период из средней части кроны проводили сбор шишек, по 30–40 шт. с модельного дерева. Для каждой из шишек измеряли длину и диаметр. С помощью методики, предложенной С.А. Мамаевым [7], определяли коэффициент формы шишек.

На следующем этапе работы выполняли сушку шишек в термостате при температуре 45 °С с принудительной вентиляцией, чтобы избежать перегрева семян. Затем извлекали семена и проводили подсчет их количества в шишках. Вес 1000 полнозернистых семян устанавливали с точностью до 0,1 г в 4-кратной повторности. В дальнейшем с целью изучения динамики жизненных характеристик семян осуществляли их проращивание на увлажненной фильтровальной бумаге в чашках Петри при температуре 20–22 °С. На 7-й и 15-й дни проращивания оценивали энергию прорастания и всхожесть каждого образца семян в 4-кратной повторности [13].

Для характеристики уровня адаптации *P. sylvestris* в качестве тест-объекта были выбраны естественные древостои вида. Исследования проводили в верхнем поясе распространения *P. sylvestris* в горном Крыму. В районе Никитского хребта на высоте 1150 м над ур. м. в естественных древостоях *P. sylvestris* была заложена пробная площадь размером 0,5 га, на которой выделили 10 модельных деревьев. Сбор и анализ образцов шишек и семян проводили аналогично исследованию материала, заготовленного в искусственных насаждениях *P. sylvestris*.

Обработку полученных результатов осуществляли общепринятыми методами статистики [5].

Результаты исследования и их обсуждение

Размеры и форма шишек детерминируются влиянием факторов внешней среды, а также генетическими особенностями индивида [7]. По изучаемым пробным площадям в лесных культурах *P. sylvestris* на крымских яйлах в годы наблюдений средние показатели длины шишек изменялись от 5,0 до 6,7 см, диаметра – от 2,4 до 4,0 см (табл. 1). Эндогенное варьирование данных признаков характеризуется примерно одинаковым уровнем: для длины коэффициент вариации изменялся в пределах 3,1–9,8 %, диаметра – 3,3–13,4 %.

В ходе проведенного исследования установлена синхронность изменения длины и диаметра шишки на эндогенном уровне. При этом индивидуальная изменчивость проявляется иначе. У некоторых деревьев короткие шишки имеют большой диаметр и наоборот: длинные шишки – небольшой.

Выявлено влияние полноты насаждений на биометрические показатели шишек. При минимальной полноте (0,5) установлены максимальные значения длины и диаметра шишек. Повышение уровня освещенности способствует интенсивности ростовых процессов. В пределах Бабуган-яйлы были отмечены наиболее длинные шишки, тогда как на Тырке-яйле шишки отличаются самыми маленькими размерами. При этом средний диаметр шишек менее дифференцирован. Однако насаждения *P. sylvestris*, произрастающие на Никитской яйле, можно характеризовать как обладающие наиболее крупными шишками.

Таблица 1

**Биометрические показатели шишек в насаждениях *P. sylvestris*
на крымских яйлах**
The biometric indicators of cones in *P. sylvestris* plantations on the Crimean yaylas

Яйла	Сомкнутость крон	Год	Показатели шишки				Количество семян в шишке	
			Длина		Ширина			
			М±s, см	V, %	М±s, см	V, %	М±s, шт.	V, %
Ай-Петринская	0,9	2012	6,2±0,05	6,7	2,8±0,03	6,8	53,8±1,4	19,7
		2013	5,9±0,06	7,6	3,0±0,03	7,4	47,9±1,8	22,9
		2014	6,0±0,03	3,5	3,0±0,01	3,5	52,3±1,2	28,3
	0,5	2012	6,5±0,06	6,8	3,0±0,02	5,4	39,6±1,7	24,7
		2013	5,9±0,04	5,3	3,0±0,02	5,6	48,4±1,8	23,5
		2014	6,0±0,03	3,6	2,9±0,01	3,3	50,8±1,6	21,0
Ялтинская	0,9	2012	5,0±0,06	8,8	2,4±0,04	11,5	38,8±1,4	23,9
		2013	6,4±0,06	7,4	3,0±0,04	10,4	48,2±1,6	21,7
		2014	6,0±0,02	3,2	2,8±0,04	11,2	56,9±1,1	17,2
	0,5	2012	6,6±0,07	7,4	2,8±0,04	9,0	45,6±1,4	20,2
		2013	6,0±0,04	5,1	3,0±0,03	8,4	55,9±1,9	22,8
		2014	6,0±0,03	3,1	2,9±0,03	7,5	59,2±1,5	19,7
Никитская	0,9	2012	6,7±0,08	8,7	3,7±0,05	10,3	42,9±1,0	26,7
		2013	5,9±0,07	9,4	3,0±0,04	8,9	56,9±1,3	25,9
		2014	5,8±0,03	3,4	2,9±0,03	6,9	59,4±1,1	17,2
	0,5	2012	6,6±0,05	5,9	3,7±0,06	12,5	33,4±1,4	23,4
		2013	6,2±0,08	9,1	2,8±0,04	10,9	30,1±1,2	24,1
		2014	5,8±0,03	3,5	2,9±0,02	6,5	52,4±0,9	16,5
Бабуган	0,9	2012	6,5±0,08	8,3	2,8±0,05	13,4	46,0±1,3	21,1
		2013	6,4±0,09	9,8	2,7±0,04	12,1	53,4±1,4	19,4
		2014	6,5±0,05	5,5	2,9±0,01	4,5	54,8±1,0	16,8
	0,5	2012	6,3±0,06	7,5	4,0±0,06	10,2	45,9±1,4	20,7
		2013	6,1±0,04	4,1	3,3±0,05	10,9	48,2±1,3	19,2
		2014	6,0±0,08	9,1	2,9±0,03	6,5	56,7±1,1	17,5
Тырке	0,9	2012	6,0±0,05	5,8	3,0±0,03	7,8	38,6±1,5	21,7
		2013	5,9±0,08	9,8	2,8±0,05	12,9	46,4±1,5	18,2
		2014	5,5±0,06	7,3	2,6±0,04	11,0	52,1±1,6	20,1
	0,5	2012	6,3±0,04	4,9	3,6±0,04	8,4	47,7±1,4	19,8
		2013	5,3±0,09	9,1	3,0±0,05	11,5	48,0±1,3	19,6
		2014	5,7±0,04	5,4	2,8±0,03	8,9	53,4±1,2	18,5
Естественные древостои	–	2014	5,4±0,06	6,4	2,8±0,03	6,8	47,6±1,2	20,7

Отношение диаметра к длине характеризует форму шишек. Данный признак, который принято называть индексом формы шишек (ИФШ), широко используют при изучении популяционной структуры и внутривидовой изменчивости. С применением шкалы классификации по ИФШ, предложенной С.А. Мамаевым [7], форму шишек *P. sylvestris* в лесных культурах крымских яйл следует характеризовать как конусовидную (ИФШ = 0,46–0,54). Коэффициент вариации индивидуальной изменчивости ИФШ больше коэффициента

эндогенной изменчивости. Относительная стабильность ИФШ в кроне дерева свидетельствует о значительном влиянии генотипической составляющей на варьирование данного признака.

Семенная продуктивность сосны определяется 2 показателями: числом шишек на дереве и количеством семян в шишке. Большую часть семян в шишках изучаемых деревьев составляли полные и пустые семена. Недоразвитые и загнившие семена встречались в незначительном количестве. Варьирование числа семян в шишках связано с неравномерностью опыления. Потенциально количество семян запрограммировано, однако степень опыления вносит в эту программу существенные поправки. По мнению R. Sarvas, недостаточное опыление является одним из лимитирующих факторов семенной продуктивности сосны. Результаты исследований, выполненных ученым, свидетельствуют о том, что у *P. sylvestris* не менее 25 % семяпочек остаются неопыленными [28]. Научные изыскания Ю.К. Подгорного также показали, что процесс опыления играет важную роль в динамике семенной продуктивности *P. pallasiana* D. Don [11].

В период реципторной фазы женской шишки успех развития процессов семеношения в значительной степени определяется не только уровнем пыльцевой продуктивности, но и спецификой погодных условий во время лета пыльцы. В этот момент наряду с температурным режимом сильное влияние на процессы репродукции оказывают влажность воздуха, характер выпадения осадков и динамика движения воздушных масс, что обусловлено зависимостью эффективности опыления от количества и качества пыльцы, достигающей женских репродуктивных структур [3, 8, 9]. При ветреной и сухой погоде происходит интенсивное распространение пыльцы и даже при относительно небольшом количестве деревьев, продуцирующих пыльцу, опыление женских шишек достаточно результативно. В искусственных насаждениях *P. sylvestris* на крымских яйлах лет пыльцы обычно наблюдается во 2-й декаде мая; если в этот период часто выпадают осадки, повышена влажность воздуха и обильны туманы, то несмотря на высокую пыльцевую продуктивность опыление женских шишек может пройти с невысокой эффективностью, что в конечном итоге окажет прямое влияние на последующие этапы развития женских репродуктивных структур [4]. Шишки, которые не были опылены, прекращают рост и опадают во 2-й половине лета [8, 9]. Если опыление прошло успешно, то чешуи молодых шишек смыкаются, последующее протекание репродуктивных процессов в данном сезоне завершается частичным прорастанием пыльцы. Оплодотворение яйцеклетки происходит в конце весны – начале лета следующего года, после чего активизируется рост шишек. К началу осени развитие шишек полностью завершается, свободный вылет зрелых семян происходит в конце зимы – начале весны следующего года. Таким образом, весь цикл формирования семян, начиная с опыления женской шишки и завершая высypанием семян, занимает неполные 2 года [8, 9].

Проведенное исследование позволило установить, что семенная продуктивность *P. sylvestris* в горах Крыма, согласно 6-балльной шкале В.Г. Каппера, невысокая. Так, в 2012 г. оценка урожая семян составляла 1 балл, а в 2013 и 2014 гг. – 2 балла.

Количество семян в шишке проявляет значительный уровень изменчивости – до 28,3 %, при этом средние числа семян в шишках лесных культур *P. sylvestris* на яйлах достаточно близкие. Выявлены некоторые различия по

годам, в целом наиболее высокая семенная продуктивность по количеству семян в шишке отмечалась в 2014 г. Так, например, на Никитской яйле в посадках с полнотой 0,9 среднее число семян в шишке составило $59,4 \pm 1,1$ шт.

Для выявления факторов, которые могли бы оказать влияние на эффективность опыления женских шишек, была проведена оценка климатических условий в период вылета пыльцы. Используя данные Ай-Петринской метеостанции, анализировали динамику температурного и влажностного режимов, скорости ветра и количества часов солнечного сияния во 2-й декаде мая в 2010, 2011 и 2012 гг., которые с учетом длительности развития процессов репродукции, как это было показано выше – от опыления до высыпания семян, определяли уровень интенсивности семеношения в 2012, 2013 и 2014 гг. соответственно. Результаты анализа позволили установить, что с наибольшей вероятностью на эффективность процесса опыления женских шишек *P. sylvestris* в условиях яйлы оказывает влияние количество часов солнечного сияния (рис. 1). Коэффициент корреляции этого показателя и среднего количества семян в шишке для насаждений Ай-Петринской яйлы с полнотой 0,5 составил $0,950 \pm 0,312$, в насаждениях с полнотой 0,9 эта связь была несколько выше – $0,989 \pm 0,147$. Влияние других климатических факторов менее существенно, оно в основном проявляется на уровне тенденций.

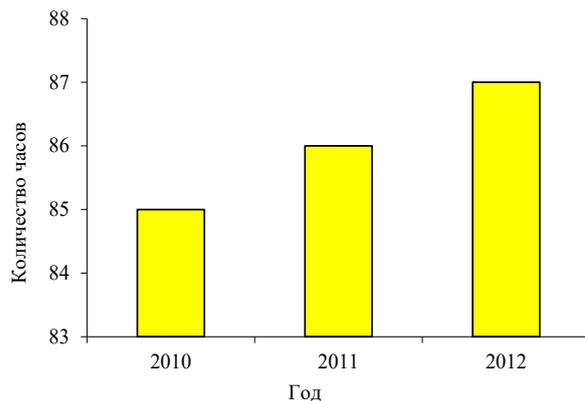


Рис. 1. Количество часов солнечного сияния в период вылета пыльцы (2-я декада мая) в искусственных насаждениях *P. sylvestris* в районе Ай-Петринской яйлы

Fig. 1. The number of hours of sunshine during the period of pollen flight (the 2nd ten days of May) in artificial *P. sylvestris* plantations in the area of Ai-Petrinskaya Yayla

Из литературных данных известно о наличии связи между размерами семян и их массой [21]. Однако наше исследование не позволило выявить подобной закономерности. У отдельных деревьев масса семян непостоянна и зависит от размера шишки и ее положения в кроне. Коэффициент индивидуальной вариации признака составляет 7,2–13,9 %, а эндогенной – 8,5–10,1 %.

Энергия прорастания и всхожесть семян являются важнейшими показателями результативности развития генеративной сферы сосны. Однако их определение требует достаточно длительных лабораторных наблюдений. Поэтому многие исследователи пытались выявить внешние признаки, которые отражали бы посевные качества семян. Больше всего было проведено работ по изучению связи качества семян с размером шишек и массой семян.

В ходе нашего исследования установлена зависимость между массой семян и их всхожестью. На Ялтинской яйле в насаждениях, плотность которых составляет 0,9, уровень зависимости изучаемых показателей – $0,564 \pm 0,134$. Однако для длины и диаметра шишек зависимости обнаружено

не было. В целом по качеству семян, продуцируемых отдельными деревьями *P. sylvestris*, наблюдались заметные различия, особенно по энергии прорастания, минимальное и максимальное значения которой были соответственно 15,2 и 52,4 % (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика качества семян в насаждениях *P. sylvestris* на крымских яйлах
The characteristics of seed quality in *P. sylvestris* plantations on the Crimean yaylas

Яйла	Сомкнутость крон	Год	Масса		Энергия прорастания		Всхожесть	
			M±s, г	V, %	M±s, %	V, %	M±s, %	V, %
Ай-Петринская	0,9	2012	10,6±0,1	9,9	31,9±0,9	30,2	60,1±1,7	29,5
		2013	11,4±0,2	11,3	52,4±2,4	32,7	69,5±2,3	23,9
		2014	9,9±0,1	7,8	35,4±1,6	33,0	70,7±2,1	21,1
	0,5	2012	11,4±0,2	11,1	36,7±1,8	34,3	64,3±2,3	25,2
		2013	10,7±0,2	11,9	51,5±2,4	33,6	72,5±2,4	23,8
		2014	9,8±0,2	13,9	45,5±2,1	32,9	74,5±2,2	20,7
Ялтинская	0,9	2012	11,7±0,2	12,8	18,6±0,9	34,8	48,1±1,5	25,6
		2013	10,5±0,2	11,7	39,7±1,7	31,1	56,2±1,9	24,1
		2014	9,6±0,1	8,0	27,0±1,2	31,9	50,8±1,5	21,1
	0,5	2012	11,1±0,1	9,9	20,1±0,9	31,2	47,3±2,5	23,8
		2013	10,5±0,2	12,2	39,5±1,9	33,2	56,9±2,2	27,8
		2014	9,5±0,1	9,8	25,5±1,2	32,5	48,5±1,6	26,9
Никитская	0,9	2012	11,1±0,1	9,9	20,1±0,9	31,2	48,4±2,5	23,8
		2013	14,6±0,2	7,2	40,8±1,9	31,1	50,6±1,9	26,3
		2014	9,2±0,1	9,6	30,4±1,4	33,3	60,1±1,7	20,2
	0,5	2012	12,5±0,2	10,7	38,2±1,7	30,7	54,4±2,1	27,3
		2013	14,0±0,2	11,9	41,1±1,8	30,3	50,0±1,7	24,7
		2014	9,7±0,1	8,7	31,6±1,3	29,5	55,4±1,8	23,2
Бабуган	0,9	2012	11,1±0,2	11,6	21,7±1,0	33,4	46,7±1,6	31,1
		2013	9,8±0,2	12,3	42,5±1,9	32,5	48,9±2,1	30,5
		2014	9,6±0,1	7,4	34,7±1,6	33,1	57,1±2,0	25,1
	0,5	2012	11,5±0,1	7,6	21,1±0,9	29,2	49,9±2,2	31,7
		2013	10,5±0,1	8,2	51,7±2,1	28,3	62,8±2,4	27,1
		2014	9,8±0,1	10,3	35,7±1,7	34,5	60,0±2,1	24,9
Тырке	0,9	2012	11,1±0,1	9,3	15,2±0,7	33,7	46,2±2,1	32,1
		2013	9,6±0,2	13,5	26,4±1,2	30,2	48,3±2,1	31,1
		2014	9,6±0,2	12,4	30,0±1,3	32,8	61,4±2,0	23,3
	0,5	2012	10,8±0,2	13,3	29,1±1,5	35,4	57,6±2,6	31,7
		2013	10,8±0,2	11,8	43,1±1,8	29,9	58,1±2,3	28,8
		2014	9,8±0,1	9,7	29,0±1,4	34,3	57,9±2,0	24,8
Естественные древостой	–	2014	10,1±0,2	9,5	37,5±1,7	30,6	63,5±2,5	27,1

В целом энергия прорастания и всхожесть семян в 2014 г. оказались выше в сравнении с 2012 г. В лесных культурах Ай-Петринской яйлы в период наблюдений формировались наиболее качественные семена. В 2014 г. в насаждениях с полнотой 0,5 всхожесть семян составила 74,5±2,2 %. Самые низкие уровни

энергии прорастания и всхожести семян отмечены в насаждениях *P. sylvestris* на Тырке-яйле, в 2012 г. эти показатели здесь составили $15,2 \pm 0,7$ и $46,2 \pm 2,1$ % соответственно.

Относительно непродолжительный период наблюдений за семенной продуктивностью искусственных насаждений *P. sylvestris* на яйле не позволяет четко определить связь качества семян с динамикой условий произрастания. Однако установлено, что на крымских яйлах развитие процессов семеношения вида в большей степени зависит от индекса сухости, выраженного в совместном действии увлажненности и температурного режима [14]. Коэффициент корреляции между всхожестью семян и индексом сухости летнего периода и начала формирования семян (рис. 2) для насаждений Ай-Петринской яйлы с полнотой 0,9 составил $0,990 \pm 0,142$, в насаждениях с полнотой 0,5 он был незначительно ниже – $0,976 \pm 0,218$. Влияние других климатических факторов менее существенно.

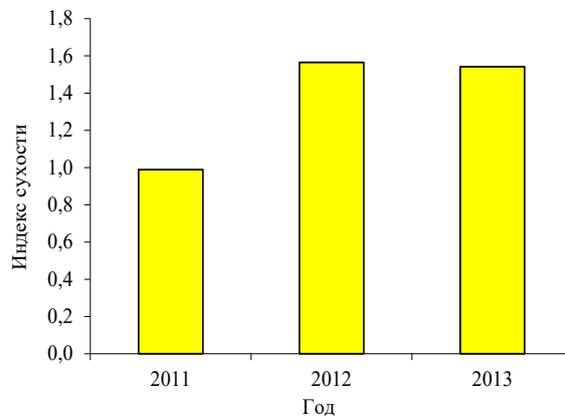


Рис. 2. Индекс сухости летнего периода в районе Ай-Петринской яйлы

Fig. 2. The dryness index of the summer period in the area of the Ai-Petrinskaya Yayla

В 2014 г. дополнительно были проведены работы по изучению биометрических характеристик шишек и показателей качества семян в естественных древостоях *P. sylvestris*. В горном Крыму естественные древостои *P. sylvestris* в некоторых местах достигают кромки яйлы, поэтому характеристики развития процессов репродукции данного вида могут быть использованы как тестовые показатели при оценке адаптации и в конечном итоге натурализации интродуцированного вида, которым является *P. sylvestris*.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что биометрические показатели шишек сосны естественных и искусственных насаждений различаются незначительно: в лесных культурах на яйле они несколько выше, чем в естественных древостоях. Среднее количество семян в шишке и их масса также имеют весьма близкие значения. Энергия прорастания и всхожесть семян *P. sylvestris* на Ай-Петринской яйле были даже более высокие, чем в природных насаждениях *P. sylvestris*. На других яйлах показатели качества семян различались в целом не очень существенно. Таким образом, развитие генеративной сферы *P. sylvestris* в искусственных насаждениях на крымских яйлах проходит достаточно эффективно.

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии пессимальных условий для произрастания искусственных насаждений *P. sylvestris* в горном Крыму. Процессы семеношения и в целом развития генеративной сферы у изученных древостоев протекают схоже с естественными насаждениями вида.

В итоге большое практическое значение для Крымского полуострова имеет заготовка семян в пределах искусственных насаждений *P. sylvestris*, произрастающих на яйлах.

Эффективность лесокультурных работ во многом зависит не только от качества семенного материала, но и от его эколого-генетического соответствия конкретным лесорастительным условиям. Каждая природная популяция в процессе развития формирует генотипический состав, адаптированный к тем условиям среды, на фоне которых под давлением отбора проходят микроэволюционные изменения. Перенесенная в новые условия популяция через наследственно обусловленную норму реакции отражает адаптивные свойства, проявляющиеся в динамике ее роста и устойчивости [12].

В горных ландшафтах негативное действие экологического несоответствия семенного материала значительно усиливается в связи с высотной поясностью и орографической неоднородностью. Поэтому на уровне семенных потомков даже 1-го поколения в результате естественных процессов элиминации происходит формирование эколого-генетического потенциала искусственных популяций или группы растений, который в большей степени отвечает новым условиям произрастания.

В настоящее время возможности селекционных работ в искусственных насаждениях *P. sylvestris* на яйлах значительно расширяются, т. к. многие из насаждений достигли возраста репродуктивной активности (40–50 лет). Отбор и использование семенного материала, адаптированного к местным условиям произрастания, будет способствовать повышению эффективности фитомелиоративных работ на крымских яйлах.

Заключение

В лесных культурах *Pinus sylvestris* на крымских яйлах длина шишек изменяется в пределах 5,0–6,7 см, диаметр – 2,4–4,0 см. Количество семян в шишке значительно варьирует, при этом средние показатели имеют достаточно близкие значения. Масса семян изменяется по годам и в связи с особенностями условий произрастания. Коэффициент эндогенной и индивидуальной вариации данного признака невысок и варьирует в пределах 8,5–10,1 и 7,2–13,9 % соответственно.

Жизнеспособность семян отдельных деревьев *P. sylvestris* характеризуется существенными различиями, особенно по уровню энергии прорастания, значения которой варьируют от 26,4 до 52,4 %. На динамику качества семян наиболее существенное влияние оказывает уровень сухости в период формирования репродуктивных структур, который оценивают при помощи индекса сухости, учитывающего совместное действие нескольких факторов.

Биометрические характеристики шишек и семян искусственных насаждений *P. sylvestris* на яйлах Крыма схожи с показателями естественных древостоев вида, что, в свою очередь, свидетельствует о благоприятных условиях для произрастания *P. sylvestris* на территории полуострова.

В настоящее время возможности проведения селекционно-лесокультурных работ в искусственных насаждениях *P. sylvestris* на яйлах значительно увеличиваются, т. к. многие из насаждений вступили в фазу репродуктивной активности. Применение семенного материала, адаптированного к местным условиям произрастания, повысит эффективность фитомелиоративных работ на крымских яйлах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Ведь И.П.* Климат и облесение Крымских нагорий / под ред. А.Н. Олиферова. Симферополь: ТНУ им. В.И. Вернадского, 2007. 135 с.
Ved' I.P. *Climate and Afforestation of the Crimean Highlands*. Ed. by A.N. Oliferov. Simferopol, Taurida National V.I. Vernadsky University, 2007. 135 p. (In Russ.).
2. *Денек В.Н., Капралов А.В., Садриева Л.Л.* Учет урожая лесных семян: метод. указания к проведению практ. занятия для студентов ЛХФ оч. и заоч. форм обучения, специальность 250201 «Лесное дело». Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 15 с.
Deneko V.N., Kapralov A.V., Sadrieva L.L. *Accounting for Harvest of Forest Seeds: Methodical Instructions for Conducting a Practical Lesson for Full-Time and Part-Time Students of the Faculty of Forestry, Speciality 250201 "Forestry"*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2012. 15 p. (In Russ.).
3. *Дрейманис А.А.* Распространение пыльцы сосны обыкновенной и семеношение на некоторых семенных плантациях Латвийской ССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Елгава, 1972. 18 с.
Dreimanis A.A. *Distribution of Scots Pine Pollen and Seed Production in Some Seed Plantations of the Latvian SSR: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs.* Jelgava, 1972. 18 p. (In Russ.).
4. *Коба В.П., Крестьянишин И.А.* Фенология пыления и качество пыльцы сосны обыкновенной в искусственных насаждениях крымской яйлы // Лесоведение. 2017. № 6. С. 424–430.
Koba V.P., Krest'yanishin I.A. *Dispersal and Quality of Scots Pine in Plantations of Crimean Yayla. Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 424–430. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0024114817060043>
5. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.
Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 352 p. (In Russ.).
6. Лесная таксация / сост. В.С. Сергеева, И.Э. Крамынина. Иркутск: БГУЭП, 2013. 250 с.
Forest Inventory. Comp. by V.S. Sergeeva, I.E. Kramynina. Irkutsk, BSUEL Publ., 2013. 250 p. (In Russ.).
7. *Мамаев С.А.* Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (На примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.
Mamaev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (By the Example of the Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p. (In Russ.).
8. *Некрасова Т.П.* Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири / отв. ред. А.И. Ирошников. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 169 с.
Nekrasova T.P. *Pollen and Pollen Regime of Siberian Conifers*. Ed.-in-Chief A.I. Iroshnikov. Novosibirsk, Nauka Publ. (Sib. Department), 1983. 169 p. (In Russ.).
9. *Некрасова Т.П.* Изменчивость числа семян в шишках сосны от опыления // Лесоведение. 1986. № 1. С. 38–42.
Nekrasova T.P. *Variability of the Number of Seeds in Pine Cones due to Pollination. Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1986, no. 1, pp. 38–42. (In Russ.).
10. *Олиферов А.Н.* Яйла: география, лес, вода. Симферополь: Бизнес-Информ, 2011. 190 с.
Oliferov A.N. *Yayla: Geography, Forest, Water*. Simferopol, Business-Inform Publ., 2011. 190 p. (In Russ.).
11. *Подгорный Ю.К., Ругузов И.А.* Особенности микроспорогенеза и развития мужского гаметофита сосны крымской в связи с семеношением и жизнеспособностью популяций // Бюл. Гос. Никит. ботан. сада. 1979. Вып. I(38). С. 21–25.
Podgornyj Yu.K., Ruguzov I.A. *Peculiarities of Microsporogenesis and Development of the Male Gametophyte of Crimean Pine in Connection with Seed Production and the Via-*

bility of Populations. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens, 1979, iss. I(38), pp. 21–25. (In Russ.).

12. Понов П.П. Географическая изменчивость семенной продуктивности *Picea abies* и *P. obovata* (Pinaceae) // Растит. ресурсы. 2006. Т. 42, № 4. С. 1–8.

Попов Р.Р. Geographical Variability of Seed Production of *Picea abies* and *P. obovata* (Pinaceae). *Rastitelnye Resursy*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 1–8. (In Russ.).

13. Ростовцев С.А., Любич Е.С., Соломонова А.А. Семена деревьев и кустарников, методы определения всхожести. М., 1975. 37 с.

Rostovtsev S.A., Lyubich E.S., Solomonova A.A. *Seeds of Trees and Shrubs, Methods for Determining Germination*. Moscow, 1975. 37 p. (In Russ.).

14. Селянинов Г.Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата // Мировой агроклиматический справочник. Л.; М.: Гидрометеиздат, 1937. С. 5–27.

Selyaninov G.T. Methodology for Agricultural Climate Characteristics. *Mirovoy agro-klimaticheskij spravochnik*. Leningrad, Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1937, pp. 5–27. (In Russ.).

15. Balekoglu S., Caliskan S., Dirik H. Effects of Geoclimatic Factors on the Variability in *Pinus pinea* Cone, Seed, and Seedling Traits in Turkey Native Habitats. *Ecological Processes*, 2020, vol. 9, art. no. 55. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00264-3>

16. Batkhuu N.O., Udval B., Jigjid B.E., Jamyansuren S., Fischer M. Seed and Cone Morphological Variation and Seed Germination Characteristics of Scots Pine Populations (*Pinus sylvestris* L.) in Mongolia. *Mongolian Journal of Biological Sciences*, 2020, vol. 18(2), pp. 41–54. <https://doi.org/10.22353/mjbs.2020.18.14>

17. Bravo F., Maguire D., González-Martínez S. Factors Affecting Cone Production in *Pinus pinaster* Ait.: Lack of Growth-Reproduction Trade-Offs but Significant Effects of Climate and Tree and Stand Characteristics. *Forest Systems*, 2017, vol. 26, iss. 2, art. no. e07S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11200>

18. Degtyareva A. Characteristics of *Pinus sylvestris* L. Seeds Under Drought Conditions in the Steppe Region of the Central Chernozem Region. *Journal of Agriculture and Environment*, 2021, no. 3(19), art. no. 1. <https://doi.org/10.23649/jae.2021.3.19.1>

19. Freire A.J., Rodrigues C.G., Tomé M. Climate Change Impacts on *Pinus pinea* L. Silvicultural System for Cone Production and Ways to Contour Those Impacts: A Review Complemented with Data from Permanent Plots. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 2, art. no. 169. <https://doi.org/10.3390/f10020169>

20. Gülcü S., Bilir N. Growth and Survival Variation among Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Provenances. *International Journal of Genomics*, 2017, vol. 2017, art. no. 1904623. <https://doi.org/10.1155/2017/1904623>

21. Khamitov R.S., Andronova M.M., Korchagov S.A., Khamitova S.M. Variability of Siberian Stone Pine Seed Yield in Introduction Plantations in the Vologda Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 979, art. no. 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979010912010>

22. Mullin T.J., Persson T., Abrahamsson S., Gull B.A. Effects of Inbreeding Depression on Seed Production in Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 4, no. 7, pp. 854–860. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0049>

23. Mutke S., Gordo J., Gil L. Variability of Mediterranean Stone Pine Cone Production: Yield Loss as Response to Climate Change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, vol. 132, iss. 3–4, pp. 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.08.002>

24. Neyko I., Kolchanova O., Monarkh V., Poznyakova S. Seed Productivity and Variability of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Clones of Finnish Origin in Seed Orchard in the Central Part of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2020, vol. 62(1), pp. 1–12. <https://doi.org/10.2478/ffp-2020-0001>

25. Parfenova E.I., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Tchebakova N.M. Climate Warming Impacts on Distributions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Zones and Seed Mass across Russia in the 21st Century. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 8, art. no. 1097. <https://doi.org/10.3390/f12081097>

26. Redmond M.D., Forcella F., Barger N.N. Declines in Pinyon Pine Cone Production Associated with Regional Warming. *Ecosphere*, 2012, vol. 3, iss. 12, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1890/ES12-00306.1>

27. Sannikov S.N., Sannikova N.S., Petrova I.V., Egorov E.V. The Hypothesis about the Lofoten Pleistocene Refugium for *Pinus sylvestris* L. *Russian Journal of Ecology*, 2019, vol. 50, pp. 218–226. <https://doi.org/10.1134/S1067413619030123>

28. Sarvas R. Investigations of the Flowering and Seed Crop of *Pinus sylvestris* L. *Communicationes Inscituti Forestalls Fenniae*, 1962, vol. 53, no. 4, pp. 1–198.

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

Научная статья

УДК 631.811:581.131:582.47

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-81-91

Фотосинтез, минеральное питание и продуктивность лиственных и хвойных видов дендрофлоры центральной части Русской равнины

В.М. Лебедев, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID*: [M-8699-2019](https://orcid.org/0000-0003-3316-854X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>

Е.В. Лебедев[✉], *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID*: [G-9445-2019](https://orcid.org/0000-0002-5824-6981),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>

Нижегородский государственный агротехнологический университет, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 20.05.22 / Одобрена после рецензирования 19.09.22 / Принята к печати 21.09.22

Аннотация. Выполнено эколого-физиологическое ретроспективное преобразование данных таблиц сухих масс, полученных В.А. Усольцевым, для 7 хвойных и лиственных видов (*Larix sukaczewii*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula alba*, *Quercus robur*, *Tilia cordata* и *Fraxinus excelsior*) центральной части Русской равнины. В возрастном интервале от 5–20 до 80–200 лет на уровне организма определены показатели чистой продуктивности фотосинтеза, чистой минеральной продуктивности, чистой первичной продукции, депонирования углерода, эмиссии свободного кислорода и биологической продуктивности. При установлении указанных параметров растения рассматривались с позиций экологии и строения модулярного организма. Расчет чистой минеральной продуктивности выполнен по И.А. Муромцеву и В.М. Лебедеву, а чистой продуктивности фотосинтеза – по А.А. Ничипоровичу. Зафиксировано снижение всех физиологических показателей с возрастом при одновременном росте отношения корневого потенциала к фотосинтетическому (как адаптивная реакция на снижение доступности элементов питания). У всех видов при достижении возраста 20–30 лет выявлено резкое снижение поглотительной деятельности корней, которая к 50–60-летнему возрасту стабилизировалась на крайне низком уровне. Связь перечисленных показателей растений с их возрастом для исследуемых видов была отрицательной, а связь минеральной продуктивности с биологической характеризовалась как высокая положительная. В сравнимые возрастные периоды (30, 60 и 90 лет) исследуемые виды различались по поглощению азота корневой системой в 21,7–28,0 раза, по чистой продуктивности фотосинтеза – в 4,4–7,0 раза, по чистой первичной продукции – в 1,8–6,2 раза, по поглощению азота – в 3,2–6,1 раза, по депонированию углерода и эмиссии свободного кислорода – в 1,8–6,2 раза и по массе целого растения – в 2,4–3,9 раза. По накопленной сухой массе древесные виды в 90-летнем возрасте располагались в такой последовательности по убыванию: дуб, ель, лиственница, сосна, липа, ясень, береза.

Ключевые слова: лесообразующие виды, фотосинтез, минеральная продуктивность, чистая первичная продукция, депонирование углерода, эмиссия свободного кислорода, онтогенез, центр Русской равнины

Для цитирования: Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Фотосинтез, минеральное питание и продуктивность лиственных и хвойных видов дендрофлоры центральной части Русской равнины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 81–91. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-81-91>

Original article

Photosynthesis, Mineral Nutrition and Productivity of Deciduous and Coniferous Dendroflora Species in the Central Part of the Russian Plain

Valentin M. Lebedev, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8699-2019](https://orcid.org/0000-0003-3316-854X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>

Evgenij V. Lebedev[✉], Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-9445-2019](https://orcid.org/0000-0002-5824-6981)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru[✉]

Received on May 20, 2022 / Approved after reviewing on September 19, 2022 / Accepted on September 21, 2022

Abstract. An ecological and physiological retrospective transformation of the data from the dry mass tables obtained by V.A. Usoltsev has been carried out for 7 coniferous and deciduous species (*Larix sukaczewii*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula alba*, *Quercus robur*, *Tilia cordata* and *Fraxinus excelsior*) in the central part of the Russian Plain. In the age range from 5–20 to 80–200 years, the indicators of net photosynthetic productivity, net mineral productivity, net primary production, carbon sequestration, free oxygen emission and biological productivity have been determined at the organism level. When establishing these parameters, plants have been considered from the standpoint of ecology and the structure of a modular organism. The calculation of net mineral productivity has been carried out according to I.A. Muromtsev and V.M. Lebedev, and the net productivity of photosynthesis has been calculated according to A.A. Nichiporovich. A decrease in all physiological parameters with age has been recorded at a simultaneous increase in the ratio of root to photosynthetic potential (as an adaptive response to a decrease in the availability of nutrients). In all species, upon reaching the age of 20–30 years, a sharp decrease in the absorption activity of the roots has been revealed, which has stabilized at an extremely low level by the age of 50–60 years. The relationship between the listed plant indicators and their age for the studied species has been negative, and the relationship between mineral and biological productivity has been characterized as highly positive. In comparable age periods (30, 60 and 90 years), the studied species differed in nitrogen absorption by the root system by 21.7–28.0 times, in net photosynthetic productivity – by 4.4–7.0 times, in the value of net primary production – by 1.8–6.2 times, in nitrogen absorption – by 3.2–6.1 times, in carbon sequestration and free oxygen emission – by 1.8–6.2 times, and in the mass of the whole plant – by 2.4–3.9 times. According to the accumulated dry mass, tree species at 90 years of age have been arranged in the following descending order: oak, spruce, larch, pine, linden, ash and birch.

Keywords: forest-forming species, photosynthesis, mineral productivity, net primary production, carbon sequestration, free oxygen emission, ontogeny, center of the Russian Plain



For citation: Lebedev V.M., Lebedev E.V. Photosynthesis, Mineral Nutrition and Productivity of Deciduous and Coniferous Dendroflora Species in the Central Part of the Russian Plain. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 4, pp. 81–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-81-91>

Введение

Рассмотрение вопросов изучения и повышения продуктивности лесных насаждений совместно с вопросами депонирования ими углерода и эмиссии кислорода актуально для России, имеющей обширный бореальный пояс [24, 26]. Потенциал биосферной роли лесных фитоценозов и их способность к депонированию углерода могут быть определены путем математического моделирования [14, 16, 17, 19–22]. Получение объективных прогностических результатов биологической продуктивности лесных насаждений возможно только с учетом количественных показателей работы фотосинтетического аппарата и поглотительной деятельности корневых систем растений в разных условиях произрастания. Тем не менее современный методический инструментарий исследования биологической продуктивности почти не рассчитан для работы на уровне организма, что объясняется сложностью древесных форм, имеющих значительную массу и развитую глубокую корневую систему, как объектов исследования. Однако накопление сведений о закономерностях распределения компонентов биомассы древесных видов в различных регионах [15] позволило использовать для эколого-физиологического преобразования числовых значений сухих масс растений предложенные нами балансовые методы получения количественных физиологических данных реакции корневой системы и листового аппарата на комплекс условий произрастания на уровне организма в течение онтогенеза, а также показатели наших модельных опытов и информацию о почвенно-климатических условиях мест произрастания изучаемых древесных видов [3, 5, 8–10].

Цель работы – получить количественные показатели работы корневой системы, листового аппарата лиственных и хвойных видов и определить характер взаимосвязи этих показателей при продуцировании фитомассы в насаждениях центра Русской равнины в процессе онтогенеза путем эколого-физиологического преобразования таблиц фитомасс древостоев.

Объекты и методы исследования

Данные таблиц сухих масс изучаемых древесных видов для древостоев разных возрастов, приведенные для 1 га [15], трансформировали в показатели для условного растения средней массы, определяли площади листового аппарата и данные чистой продуктивности фотосинтеза – ЧПФ, г/(м²·день) [1, 11, 13]. Депонирование углерода (ДУ) и эмиссию свободного кислорода рассчитывали по [2, 4]. За вегетацию принят безморозный период, т. к. отрицательные температуры негативно влияют на фотосинтетический аппарат [23, 25].

Комплексный анализ табличных показателей фитомасс проведен для искусственных насаждений лиственницы (*Larix sukaczewii* Ledeb), ели (*Picea abies* L.), сосны (*Pinus sylvestris* L.), березы (*Betula alba* Roth.), дуба (*Quercus robur* L.), липы (*Tilia cordata* L.) и ясеня (*Fraxinus excelsior* L.), произрастающих в ус-

ловиях Русской равнины [15] (табл. 1). Длительность безморозного периода для всех изучаемых насаждений составила 140 дн., класс бонитета изменялся от I до Ib.

Таблица 1

Характеристика древостоев лесообразующих пород центра Русской равнины
The characteristics of forest stands of forest-forming species in the center
of the Russian Plain

Насаждения	Возрастной период, лет	Тип почвы
Сомкнутые культуры лиственницы	От 15 до 120	Чернозем
Сомкнутые культуры ели	От 10 до 120	Серая лесная
Сомкнутые сосняки	От 10 до 140	Дерново-подзолистая
Культуры березы	От 5 до 100	Чернозем
Нормальные древостои семенного дуба	От 20 до 160	Серая лесная
Семенные насаждения липы	От 20 до 200	Чернозем
Культуры ясеня	От 20 до 80	

Активную поверхность корневой системы и ее минеральную продуктивность (МП) определяли по методикам И.А. Муромцева и В.М. Лебедева, а также нашим разработкам [6, 8, 11, 12, 18]. Биологическую продуктивность (БП) устанавливали как показатель, отражающий темп прироста сухой фитомассы за возрастной интервал [7]. Чистую минеральную продуктивность по азоту – ЧМП(N) – по отношению к единице площади питания растения. Полученные количественные данные подвергали корреляционному и регрессионному анализу.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализом, произведенным нами ранее, было установлено, что у всех видов в диапазоне возрастов от 5–20 и до 80–200 лет наблюдалось снижение ЧПФ, БП, а также ДУ с возрастом в 2,4–5,8; 1,5–3,6 и 1,8–9,8 раза соответственно [11], корреляция этих показателей с возрастом у всех исследуемых видов была отрицательной. У каждого древесного вида ЧПФ, БП и ДУ падали к возрасту 30–40 лет, после чего оставались практически стабильными с тенденцией к снижению. Одновременно поглощение азота, фосфора и калия падало до 55,8; 45,0 и 48,2 раза соответственно. При этом у всех видов наблюдалась высокая обратная корреляция МП с возрастом по 3 элементам питания – N, P, K. Необходимо отметить, что снижение МП у всех исследуемых видов проявлялось раньше на 10–20 лет, чем уменьшение ЧПФ и БП. Таким образом, наиболее ранним индикатором падения БП являлась МП, т. е. на прогрессирующее истощение растущим древостоем минерального питания в почве растения реагировали интенсификацией роста корневой системы, в результате чего наблюдалось увеличение поверхности поглощающих корней относительно площади листьев (поверхности хвои). Это выразилось в повышении отношения корневого потенциала (КП) к фотосинтетическому (ФП) с возрастом в 1,55–13,58 раза. При этом между МП и ЧПФ, а также между МП(N, P, K) и БП наблюдались средняя и высокая положительные корреляции соответственно [11].

В табл. 2 приведены уравнения регрессии и коэффициенты достоверности аппроксимации для связей с возрастом ЧПФ, БП, КП/ФП и МП(N). Коэффициенты достоверности аппроксимации для полученных уравнений, кроме уравнения для связи ЧПФ с возрастом по березе, высокие. Степенные уравнения почти всегда показывали высокую достоверность аппроксимации, за исключением уравнений, описывающих связь с возрастом отношения КП/ФП для сосны, березы и дуба. Показано, что БП растений снижалась с возрастом не так интенсивно, как ЧПФ и БП. У всех древесных видов наблюдалась высокая положительная корреляция отношения КП/ФП с возрастом. Связь отношения КП/ФП с показателями МП(N), ЧПФ и БП, наоборот, была высокой отрицательной. Показатели листового и корневого индексов у изучаемых древесных видов с возрастом варьировали от 1,4 до 3,4 и от 1,4 до 25,5 раза соответственно, причем корневой индекс рос независимо от возраста, что говорит об устойчивости механизма адаптации растений к постепенному истощению элементов питания в почве.

Сравнительные количественные показатели реакции изучаемых видов на условия произрастания в 30, 60 и 90 лет представлены в табл. 3.

В возрасте 30 лет ЧПФ была максимальной у лиственных видов. У всех изучаемых видов она варьировала на уровне 4,4 раза. Высокая поглотительная деятельность корней была выявлена у дуба и ели, а все изучаемые виды по данному показателю различались между собой в 21,5 раза. Повышенные значения чистой первичной продукции (ЧПП) за безморозный период установлены у дуба (2030 г/м²), липы (1771 г/м²) и сосны (1583 г/м²), а минимальное – у ясеня (1128 г/м²). У березы, лиственницы и ели ЧПП равнялась соответственно 1361, 1372 и 1421 г/м². Различия между видами по этому показателю составили 1,8 раза. Самая высокая ЧМП(N) отмечена у ели, дуба, ясеня и сосны – соответственно 7,0; 6,7; 6,6 и 6,1 г/м². У березы и липы этот показатель находился на уровне 4,1 и 4,8 г/м² соответственно, а самый низкий отмечен у лиственницы – 2,2 г/м². По ЧМП(N) на единицу площади питания виды различались в 3,2 раза. При формировании ЧПП за безморозный период в процессе фотосинтеза на единицу площади питания поглощено от 564 (ясень) до 1015 (дуб) г/м² углерода и выделено свободного кислорода от 1500 (ясень) до 2700 (дуб) г/м². Разница по этим показателям у видов составляла 1,8 раза. Наибольшие значения приведенных показателей были у дуба и липы (1015 и 886 г/м²; 2700 и 2355 г/м² соответственно).

В возрасте 60 лет ЧПФ у изучаемых видов сильно снижалась, а различия между ними составили 5,0 раза. Изменения поглотительной деятельности корневых систем древесных видов протекали аналогично ЧПФ с различиями до 30,2 раза. Снижение фотосинтетической активности и МП видов сказалось и на продуцировании фитомассы, а значит, на ЧПП. Повышенные количества накопленной биомассы отмечены у дуба (1820 г/м²) и сосны (1330 г/м²). Резкое снижение ЧПП было у березы (676 г/м²). У ясеня, лиственницы, ели и липы этот показатель зафиксирован в диапазоне от 966 до 1147 г/м². Разница по ЧПП между видами составила 2,7 раза. У всех видов с возрастом ЧМП(N) снижалась. Этот показатель был значительным у ели, сосны, дуба и ясеня (от 4,3 до 5,4 г/м²), а у лиственницы, березы и липы находился на уровне 1,5, 1,8 и 3,1 г/м² соответственно. Различия по ЧМП(N) между видами составили 3,5 раза. При формировании ЧПП древесные виды депонировали от 338 (береза) до 910 (дуб) г/м² углерода и выделили от 899 (береза) до 2421 (дуб) г/м² свободного кислорода. Разница по этим показателям у видов составляла 2,7 раза.

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа связей основных эколого-физиологических показателей лесообразующих пород центра Русской равнины с возрастом

The results of a regression analysis of the relationship between the main ecological and physiological indicators of forest-forming species in the center of the Russian Plain with age

Древесная порода	Показатель	Уравнение регрессии с коэффициентом достоверности аппроксимации (R^2)	Древесная порода	Показатель	Уравнение регрессии с коэффициентом достоверности аппроксимации (R^2)
Лиственница	ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 404,404x^{-0,478}$; $R^2 = 0,948$	Дуб	ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 1173,868x^{-0,703}$; $R^2 = 0,992$
	БП, раз	$y = 194,524x^{-0,273}$; $R^2 = 0,873$		БП, раз	$y = 891,617x^{-0,848}$; $R^2 = 0,893$
	КП/ФП	$y = 4,134x^{0,665}$; $R^2 = 1,000$		КП/ФП	$y = 47,757\ln(x) - 130,811$; $R^2 = 0,988$
Ель	МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 3468,063x^{-1,198}$; $R^2 = 0,991$	Липа	МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 13347,227x^{-1,628}$; $R^2 = 0,999$
	ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 500,669x^{-0,542}$; $R^2 = 0,838$		ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 3127,975x^{-0,966}$; $R^2 = 0,893$
	БП, раз	$y = 844,100x^{-0,740}$; $R^2 = 0,913$		БП, раз	$y = 524,109x^{-0,613}$; $R^2 = 0,816$
Сосна	КП/ФП	$y = 2,565x^{0,780}$; $R^2 = 0,985$	Ясень	КП/ФП	$y = 30,178x^{0,208}$; $R^2 = 0,875$
	МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 13014,456x^{-1,590}$; $R^2 = 0,992$		МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 9487,552x^{-1,273}$; $R^2 = 0,919$
	ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 533,504x^{-0,490}$; $R^2 = 0,824$		ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 6170,121x^{-1,202}$; $R^2 = 0,919$
Береза	БП, раз	$y = 891,617x^{-0,848}$; $R^2 = 0,893$		БП, раз	$y = 589,557x^{-0,558}$; $R^2 = 0,977$
	КП/ФП	$y = 47,757\ln(x) - 130,811$; $R^2 = 0,988$		КП/ФП	$y = 11,628x^{0,504}$; $R^2 = 0,959$
	МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 13347,227x^{-1,628}$; $R^2 = 0,999$		МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 29623,204x^{-1,706}$; $R^2 = 0,977$
Береза	ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 1265,763x^{-0,940}$; $R^2 = 0,572$		ЧПФ, г/(м ² ·день)	$y = 6170,121x^{-1,202}$; $R^2 = 0,919$
	БП, раз	$y = 250,388x^{-0,453}$; $R^2 = 0,941$		БП, раз	$y = 589,557x^{-0,558}$; $R^2 = 0,977$
	КП/ФП	$y = -0,024x^2 + 3,192x + 0,340$; $R^2 = 0,932$		КП/ФП	$y = 11,628x^{0,504}$; $R^2 = 0,959$
	МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 6060,739x^{-1,637}$; $R^2 = 0,938$		МП(N), мг/(м ² ·сут)	$y = 29623,204x^{-1,706}$; $R^2 = 0,977$

Таблица 3
 Расчетные эколого-физиологические показатели лесобразующих пород центра Русской равнины в зависимости от возраста

The estimated ecological and physiological indicators of the forest-forming species in the center of the Russian Plain depending on their age

Древесная порода	Возраст 30 лет					Возраст 60 лет					Возраст 90 лет				
	ЧПП, г/м ²	ДУ, г/м ²	Эмиссия O ₂ , г/м ²	ЧМП(Н), г/м ²	ЧПП/ ЧМП(Н), г/г	ЧПП, г/м ²	ДУ, г/м ²	Эмиссия O ₂ , г/м ²	ЧМП(Н), г/м ²	ЧПП/ ЧМП(Н), г/г	ЧПП, г/м ²	ДУ, г/м ²	Эмиссия O ₂ , г/м ²	ЧМП(Н), г/м ²	ЧПП/ ЧМП(Н), г/г
Лиственница	1372	686	1824	2,2	624	1039	520	1382	1,5	693	983	492	1307	1,4	702
Ель	1421	711	1890	7,0	203	1142	571	1519	4,3	299	941	471	1252	2,7	348
Сосна	1583	792	2105	6,1	260	1330	665	1769	4,4	302	1053	527	1400	2,9	363
Береза	1361	681	1810	4,1	332	676	338	899	1,8	376	218	109	290	0,6	382
Дуб	2030	1015	2700	6,7	303	1820	910	2421	5,3	343	1352	676	1798	3,9	347
Липа	1771	886	2355	4,8	369	1147	574	1526	3,1	370	784	392	1043	2,1	373
Ясень	1128	564	1500	6,6	171	966	483	1285	5,4	179	706*	353*	939*	4,0*	177*

* Данные приведены для 80-летнего возраста.

В 90-летнем возрасте ЧПФ у всех исследуемых видов резко понизилась до 0,2–1,4 г/(м²·день) и была минимальной у березы и ели, различаясь между всеми видами в 7,0 раза. Поглощение азота у большинства видов также резко упало – до 4–14 мг/(м²·сут), за исключением дуба – 95 мг/(м²·сут). Варьирование между исследуемыми видами по данному показателю достигло 23,7 раза. Резкое снижение накопления биомассы отмечено у березы (218 г/м²). Самое большое значение ЧПП сохранилось у дуба (1352 г/м²). У хвойных видов показатель был на уровне 983, 941 и 1053 г/м² соответственно у лиственницы, ели и сосны; у ясеня и липы – 706 и 784 г/м² соответственно. Различия между видами по накоплению ЧПП составляли 6,2 раза. Различия по накоплению ЧМП(N) были 6,1 раза. Самые большие показатели зафиксированы у дуба и ясеня – соответственно 3,9 и 4,0 г/м². У остальных видов он находился на уровне от 0,7 до 2,9 г/м². В 90-летнем возрасте при формировании ЧПП у изучаемых видов ДУ и выделение свободного кислорода варьировали от 109 до 676 и от 290 до 1798 г/м² соответственно с разницей между видами 6,2 раза.

Приведенные в табл. 3 количественные показатели ЧПП и ЧМП(N) для древостоев различных возрастов позволили определить эффективность использования поглощенного азота растениями при формировании биомассы. Установлено, что процесс протекал с различной интенсивностью у разных видов. Так, у лиственницы на 1 г поглощенного азота было сформировано 624, 693 и 702 г биомассы в 30, 60 и 90-летнем возрасте соответственно, а у ясеня – 171, 179 и 177 г соответственно, что ниже в 3,6; 3,9 и 4,0 раза, чем у лиственницы. Различия количественных показателей формирования биомассы в расчете на единицу массы азота у других видов были менее значительными. В то же время у всех видов четко наблюдалось увеличение формирования биомассы, приходящейся на 1 г поглощенного азота, при снижении ЧМП(N) с возрастом растений. Коэффициенты корреляции между количеством сформированной биомассы на 1 г поглощенного азота и ЧМП(N) с возрастом у лиственницы, ели и сосны были на уровне –1,00, –0,945 и –0,990 соответственно, а у березы, дуба, липы и ясеня равнялись –0,978, –0,904, –0,909 и –0,689 соответственно.

Выводы

1. На уровне организма рассмотрены количественные данные работы корневой системы, фотосинтетического аппарата, показатели депонирования углерода, эмиссии кислорода и биологической продуктивности у 7 лиственных и хвойных древесных видов в возрастном интервале от 5–20 до 80–200 лет в условиях центральной части Русской равнины.

2. У всех видов при достижении возраста 20–30 лет выявлено резкое снижение поглотительной деятельности корней, которая к 50–60-летнему возрасту стабилизировалась на крайне низком уровне. Связь минеральной продуктивности у всех видов с возрастом была отрицательной.

3. Чистая продуктивность фотосинтеза и биологическая продуктивность у всех видов снизились к 30–40 годам соответственно в 2,4–5,8 и в 1,5–3,6 раза. Корреляция чистой продуктивности фотосинтеза и биологической продуктивности с возрастом у всех исследуемых видов была отрицательной, а у минеральной продуктивности и биологической – высокой положительной.

4. Изучаемые в пределах центра Русской равнины древесные виды в интервале возрастов 30–90 лет различались: по поглощению азота – в 21,7–28,0 раза; чистой продуктивности фотосинтеза – в 4,4–7,0 раза; чистой первичной продукции – в 1,8–6,2 раза; поглощению азота – в 3,2–6,1 раза; массе целого растения – в 2,4–3,9 раза; депонированию углерода и выделению свободного кислорода – в 1,8–6,2 раза. По накопленной массе древесные виды в 90-летнем возрасте располагались по убыванию так: дуб, ель, лиственница, сосна, липа, ясень, береза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчѣтнов В.П., Лебедев Е.В. Фотосинтез и биологическая продуктивность лесобразующих пород Волго-Вятского региона // Актуальные проблемы лесного хозяйства и рациональное использование ресурсов Нижегородской области. Н. Новгород: НГСХА, 2002. С. 107–116.

Besschetnov V.P., Lebedev E.V. Photosynthesis and Biological Productivity of Forest-Forming Species of the Volga-Vyatka Region. *Actual Problems of Forestry and Rational Use of Resources of the Nizhny Novgorod Region*. Nizhny Novgorod, NSAA Publ., 2002, pp. 107–116. (In Russ.).

2. Биологический энциклопедический словарь / гл. ред. М.С. Гиляров. М.: Совет. энцикл., 1986. 831 с.

Biological Encyclopedic Dictionary. Ed.-in-Chief M.S. Gilyarov. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1986. 831 p. (In Russ.).

3. Географический энциклопедический словарь: Географические названия / гл. ред. А.Ф. Трешников. М.: Сов. энцикл., 1983. 528 с.

Geographical Encyclopedic Dictionary: Geographical Names. Ed.-in-Chief A.F. Treshnikov. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1983. 528 p. (In Russ.).

4. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.

Kobak K.I. *Biotic Components of the Carbon Cycle*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 248 p. (In Russ.).

5. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.

Kurnaev S.F. *Forest Zoning of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 203 p. (In Russ.).

6. Лебедев В.М. Определение активной поверхности и минеральной продуктивности корневой системы плодовых и ягодных культур // Методика исследования и вариационная статистика в научном плодоводстве: сб. докл. Междунар. науч.-метод. конф. Мичуринск, 1998. Т. 2. С. 39–42.

Lebedev V.M. Determination of the Active Surface and Mineral Productivity of the Root System of Fruit and Berry Crops. *Methods of Research and Variation Statistics in Scientific Fruit Growing: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Michurinsk, 1998, vol. 2, pp. 39–42. (In Russ.).

7. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Сравнительное определение продуктивности лесных пород // Нетрадиционные и редкие растения, природные соединения и перспективы их использования: материалы VII Междунар. симп. Белгород: Политерра, 2006. Т. 1. С. 213–216.

Lebedev V.M., Lebedev E.V. Comparative Determination of the Forest Species Productivity. *Non-Traditional and Rare Plants, Natural Compounds and Prospects for Their Use: Proceedings of the VII International Symposium*. Belgorod, Politerra Publ., 2006, vol. 1, pp. 213–216. (In Russ.).

8. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Морфологические, функциональные и физиологические особенности активной части корневой системы лесобразующих пород Волго-Вятского региона // *Агрохимия*. 2011. № 4. С. 38–44.

Lebedev V.M., Lebedev E.V. Morphological, Functional, and Physiological Features of Active Roots of Forest-Forming Species in the Volga-Vyatka Region. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*, 2011, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.).

9. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Функционирование листового аппарата, корневой системы и биологической продуктивности лиственницы сибирской на уровне организма в онтогенезе (на примере лиственничников Архангельской области) // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2018. № 3. С. 9–19.

Lebedev V.M., Lebedev E.V. Functioning of the Leaf Apparatus, Root System and Biological Productivity of Siberian Larch on the Level of the Organism in Ontogeny (the Case of Larch Forests of the Arkhangelsk Region). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 3, pp. 9–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.3.9>

10. Лебедев Е.В. Биологическая продуктивность и минеральное питание ели европейской в онтогенезе в условиях Северной Европы // *Изв. СПбЛТА*. 2012. Вып. 199. С. 4–13.

Lebedev E.V. Biological Productivity and Mineral Nutrition of Norway Spruce in the Ontogeny in Northern Europe. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2012, iss. 199, pp. 4–13. (In Russ.).

11. Лебедев Е.В. Эколого-физиологические характеристики реакции древесных пород на уровне организма на изменение режима питания: дис. ... д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2020. 368 с.

Lebedev E.V. *Ecological and Physiological Characteristics of the Reaction of Tree Species at the Organism Level to Changes in Diet*: Doc. Agric. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2020. 368 p. (In Russ.).

12. Муромцев И.А. Активная часть корневой системы плодовых растений. М.: Колос, 1969. 247 с.

Muromtsev I.A. *The Active Part of the Root System of Fruit Plants*. Moscow, Kolos Publ., 1969. 247 p. (In Russ.).

13. Ничипорович А.А. О методах учета и изучения фотосинтеза как фактора урожайности // *Тр. Ин-та физиологии растений им. К.А. Тимирязева*: сб. Т. 10. М.: АН СССР, 1955. С. 210–249.

Nichiporovich A.A. On the Methods of Accounting and Studying Photosynthesis as a Productivity Factor. *Trudy Instituta fiziologii rastenij im. K.A. Timiryazeva*: Proceedings. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1955, vol. 10, pp. 210–249. (In Russ.).

14. Суворова Г.Г., Деловеров А.Т., Оскорбина М.В., Попова Е.В. Использование ГИС-технологий в построении карт фотосинтеза хвойных на больших территориях // *Успехи соврем. биологии*. 2010. Т. 130, № 3. С. 275–285.

Suvorova G.G., Deloverov A.T., Oskorbina M.V., Popova E.V. The Use of GIS-Technologies in Constructing Maps of Photosynthesis of Conifers over Large Areas. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 2010, vol. 130, no. 3, pp. 275–285. (In Russ.).

15. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 762 с.

Usoltsev V.A. *Forest Biomass of Northern Eurasia: Mensuration Standards and Geography*. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2002. 762 p. (In Russ.).

16. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 569 с.

Usoltsev V.A. *Eurasian Forest Biomass and Primary Production Data*. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2010. 569 p. (In Russ.).

17. Цельникер Ю.Л., Корзухин М.Д., Семёнов С.М. Модельный анализ широтного распределения продуктивности лесных пород России // *Лесоведение*. 2010. № 2. С. 36–45.

Tsel'niker Yu.L., Korzukhin M.D., Semenov S.M. Model Analysis of Latitudinal Distribution of Forest Species in Russia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2010, no. 2, pp. 36–45. (In Russ.).

18. Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. *Ecology: Individuals, Populations and Communities*. Wiley-Blackwell, 1996. 1068 p.

19. Bravo F., Río del M., Bravo-Oviedo A., Ruiz-Peinado R., Peso del C., Montero G. Forest Carbon Sequestration: The Impact of Forest Management. *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change*, 2017, vol. 34, pp. 251–275. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28250-3_13

20. Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D., Utkin A., Pryaznikov A. Carbon Stock and Deposition in Phytomass of the Russian Forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, vol. 82, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/BF01182838>

21. Jiang L., Zhao W., Lewis B.J., Wei Y., Dai L. Effects of Management Regimes on Carbon Sequestration under the Natural Forest Protection Program in Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, pp. 1187–1194. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0542-0>

22. Jiao Y., Ren H.-E., Dong B. Optimal Estimation of Forest Carbon Sequestration Based on Eddy Correlation Method. *Advances in Computer Science, Intelligent System and Environment*, 2011, vol. 105, pp. 421–426. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23756-0_68

23. Lundmark T., Bergh J., Strand M., Koppel A. Seasonal Variation of Maximum Photochemical Efficiency in Boreal Norway Spruce Stands. *Trees*, 1998, vol. 13, pp. 63–67. <https://doi.org/10.1007/s004680050187>

24. Osipov A.F., Bobkova K.S. Net Primary Production of Carbon in Pine Forests on European North-East of Russia (Republic of Komi). *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, vol. 13, pp. 803–812. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070082>

25. Suvorova G.G., Oskorbina M.V., Kopytova L.D., Yan'kova L.S., Popova E.V. Seasonal Changes in Photosynthetic Activity and Chlorophylls in the Scots Pine and Siberian Spruce with Optimal or Insufficient Moistening. *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, vol. 4, iss. 6, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1134/S1995425511060105>

26. Xue L., Luo X., Wu X. Analysis of the Efficiency of Forestry Production and Convergence in China's Four Major Forest Areas Based on the Perspective of Carbon Sequestration Benefits. *Global Ecological Governance and Ecological Economy*, 2002, pp. 195–212. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7025-1_13

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(581.5:581.8)
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-92-105

Особенности роста и структуры древесины сосны на вырубке и под пологом древостоя в условиях Республики Карелии

В.Б. Придача, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [C-7354-2013](https://orcid.org/0000-0002-4031-0690),

ORCID: [hhttps://orcid.org/0000-0002-4031-0690](https://orcid.org/0000-0002-4031-0690)

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

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

Я.А. Неронова, канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3703-0898>

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

Поступила в редакцию 08.08.22 / Одобрена после рецензирования 30.11.22 / Принята к печати 01.12.22

Аннотация. Оценена внутривидовая изменчивость анатомических и гидравлических характеристик ксилемы у подростка сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в ходе естественного возобновления на вырубке и под пологом среднетаежного черничного сосняка в условиях Европейского Севера (Республика Карелия). Выявлено влияние условий местообитания на формирование структурных элементов клеток древесины. На вырубке, в условиях более высоких освещенности, температуры воздуха и почвы, переход подростка сосны в категорию крупного с высотой более 1,5 м происходит в возрасте 6 лет, тогда как под пологом спелого древостоя подрост достигает данной категории не ранее 15 лет. При этом в 1-е десятилетие роста в условиях вырубки прирост сосны по диаметру в 4 раза превышает показатель у сосны под пологом спелого древостоя вследствие формирования большего числа рядов трахеид в ранней и поздней зонах. Кроме того, у подростка сосны на вырубке отмечены наибольшая потенциальная гидравлическая проводимость ксилемы и, напротив, наименьшие удельная плотность трахеид, базисная плотность древесины и содержание поздней древесины относительно подростка сосны под пологом древостоя. У подростка под пологом леса показано достоверное снижение структурно-функциональных характеристик древесины, за исключением толщины клеточных оболочек поздних трахеид. В межгодовой динамике более строгие линейные регрессионные зависимости показателей ранних и поздних трахеид отмечены у подростка сосны под пологом леса. Полученные результаты свидетельствуют о большем соответствии условий внешней среды на вырубке оптимуму для роста и формирования древесины молодых деревьев сосны относительно условий под пологом спелого черничного сосняка. Угнетение ростовой активности подростка под пологом возникает вследствие высокой внутривидовой конкуренции со стороны господствующего соснового древостоя за свет, влагу и почвенное питание.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, ксилема, ширина годичных колец, толщина клеточной стенки, диаметр люмена, плотность древесины, гидравлическая проводимость, условия внешней среды

Благодарности: Исследование осуществлялось за счет средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН) при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-04-01087-а).

Для цитирования: Придача В.Б., Пеккоев А.Н., Неронова Я.А. Особенности роста и структуры древесины сосны на вырубке и под пологом древостоя в условиях Республики Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 92–105. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-92-105>

Original article

Features of the Growth and Structure of Pine Wood in the Felling Area and Under the Canopy of a Tree Stand in the Conditions of the Republic of Karelia

Vladislava B. Pridacha, Candidate of Biology; ResearcherID: [C-7354-2013](https://orcid.org/0000-0002-4031-0690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4031-0690>

Alexey N. Pekkoev[✉], Candidate of Agriculture; ResearcherID: [U-7771-2018](https://orcid.org/0000-0002-7881-1140),

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

Yana A. Neronova, Candidate of Agriculture; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3703-0898>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the RAS, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; pridacha@krc.karelia.ru, pek-aleksei@list.ru[✉], neronovaya@krc.karelia.ru

Received on August 8, 2022 / Approved after reviewing on November 30, 2022 / Accepted on December 1, 2022

Abstract. The intraspecific variability of the anatomical and hydraulic characteristics of xylem in the undergrowth in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) has been assessed during natural regeneration in the felling areas and under the canopy of a middle taiga blueberry pine forest in the conditions of the European North (Republic of Karelia). The influence of habitat conditions on the formation of structural elements of wood cells has been revealed. In felling areas under conditions of higher illumination, air and soil temperatures, the transition of pine undergrowth to the category of large with a height of more than 1.5 m occurs at the age of 6 years, whereas under the canopy of a mature stand the undergrowth reaches this category no earlier than 15 years. At the same time, in the 1st decade of growth under felling conditions, the growth of pine in diameter has been 4 times higher than that of pine under the canopy of a mature stand due to the formation of a larger number of rows of tracheids in the early and late zones. In addition, the pine undergrowth in the felling area has the highest potential hydraulic conductivity of the xylem, and, on the contrary, the lowest specific density of tracheids, the basic wood density and late wood content relative to the pine undergrowth under the canopy of the stand. The latter exhibited a significant decrease in the structural and functional characteristics of wood, with the exception of the thickness of the cell membranes of late tracheids. In the interannual dynamics, more stringent linear regression dependencies between the indices of early and late tracheids have been observed in pine undergrowth under the forest canopy. The results obtained indicate a greater correspondence of the environmental conditions in the felling area to the optimum for the growth and formation of wood of young pine trees relative to the conditions under the canopy of a mature blueberry pine forest. Inhibition of the growth activity of undergrowth under the canopy occurs due to high intraspecific competition from the dominant pine stand for light, moisture and soil nutrition.

Keywords: Scots pine, xylem, annual ring width, cell wall thickness, lumen diameter, wood density, hydraulic conductivity, environmental conditions

Acknowledgements: The research was funded from the federal budget for the fulfillment of the state assignment of the Karelian Research Centre of the RAS (Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the RAS) with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 17-04-01087-a).

For citation: Pridacha V.B., Pekkoiev A.N., Neronova Ya.A. Features of the Growth and Structure of Pine Wood in the Felling Area and Under the Canopy of a Tree Stand in the Conditions of the Republic of Karelia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 4, pp. 92–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-92-105>

Введение

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является одной из главных лесообразующих пород в Российской Федерации. Лесные сообщества с преобладанием хвойных в Республике Карелии занимают 87,5 % площадей, покрытых лесом [4]. Распределение лесов по породному составу в республике неравномерное вследствие более высокой эксплуатации среднетаежных лесов, а также особенностей лесовосстановительных процессов и лесорастительных условий средне- и северо-таежной подзон республики.

Одним из основных факторов воздействия на лесные экосистемы на большей части таежных территорий является деятельность по заготовке древесины [15]. Экологические последствия антропогенного воздействия на лесной покров довольно широки. На вырубках меняются климатические условия среды и преобразуется структура элементов биоразнообразия [1], в частности, может происходить нежелательная смена ценных хвойных древостоев лиственными сообществами. Предотвратить эту негативную динамику способны эффективные традиционные меры содействия естественному возобновлению хвойных пород, а также создание лесных культур. Эти мероприятия обеспечивают повышение продуктивности и хозяйственной ценности формирующихся насаждений [15].

Высокая вариабельность направления динамических процессов, происходящих на вырубках под влиянием естественных факторов, делает их значимым опытным объектом для изучения реакции растений на изменение условий внешней среды [27]. Рост и развитие молодого поколения хвойных пород на вырубке и под пологом взрослого насаждения зависят от интенсивности освещения, обеспеченности почвы минеральными элементами, содержания углекислого газа в воздухе, температурно-влажностного режима приземного слоя почвы, особенностей формирования кроны, внутри- и межвидовой конкуренции [5, 15, 32]. Выживаемость растений, их рост и продуктивность также во многом обусловлены эффективностью функционирования клеток ксилемы [22]. Ксилема, являющаяся водопроводящей тканью у древесных пород, обеспечивает фотосинтетические и растущие ткани растений водой и растворенными в ней минеральными веществами [21, 28]. Ранее нами в естественных условиях произрастания были выявлены диапазоны колебаний показателей водного, углеродного и минерального обмена сосны обыкновенной [8–10, 13], характерных для условий достаточного освещения и увлажнения почвы. Кроме того, было установлено влияние температуры воздуха и интенсивности освещения на фотосинтез сосны в условиях дефицита воды в растении [12]. Изучение

ростовых процессов, макроструктуры и анатомического строения древесины в лесах бореальной зоны, испытывающих антропогенное воздействие, позволяет более глубоко понять физиологические процессы, происходящие у древесных растений в разных экологических условиях [5, 6, 25].

Цель данного исследования – оценка внутривидовой изменчивости анатомических и гидравлических характеристик ксилемы у подростка сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в ходе естественного лесовозобновления на вырубке и под пологом спелого черничного сосняка в условиях Карельского таежного района.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования и условия местопроизрастания древостоев. Исследование проводили в 2019 г. в Карельском таежном районе на постоянных пробных площадях (ПП), заложенных на сплошной вырубке 10-летней давности ($62^{\circ}10'28,1''$ с. ш. $33^{\circ}59'58,8''$ в. д.) и в 95-летнем черничном сосняке ($62^{\circ}10'10,8''$ с. ш. $34^{\circ}00'05,4''$ в. д.). Подробная характеристика ПП представлена нами ранее [27].

Объектом исследования стало молодое поколение сосны обыкновенной I класса возраста на вырубке и под пологом спелого сосняка (рис. 1). Почвы на участках относятся к альфегумусовым песчаным подзолам. Основная масса корней деревьев на ПП расположена в почвенном слое до 25 см.



а

б

Рис. 1. Подрост сосны обыкновенной на вырубке (*а*) и под пологом спелого черничного свежего сосняка (*б*)

Fig. 1. The Scots pine undergrowth in the felling area (*a*) and under the canopy of a mature blueberry pine forest (*b*)

В процессе рубки древостоя на участке были приняты меры содействия естественному возобновлению леса – минерализация поверхности почвы и оставление до 10 шт./га семенных деревьев сосны. Сформировавшийся на вырубке молодняк характеризуется доминированием сосны в составе (7СЗБ+Ос) и имеет густоту 5510 шт./га (табл. 1).

Таблица 1

**Таксационная характеристика подроста сосны на вырубке
и под пологом черничного сосняка**
**The inventory characteristics of pine undergrowth in the felling area
and under the canopy of a blueberry pine forest**

Местообитание	Средняя высота, м	Количество подроста сосны по крупности, тыс. шт./га			Густота*, тыс. шт./га
		Мелкий	Средний	Крупный	
Вырубка	2,3	0	1,20	4,55	5,51
Под пологом леса	1,4	0,27	1,23	0,59	1,71

*Для пересчета мелкого (высотой до 0,5 м) и среднего (0,6–1,5 м) подроста в крупный использовали общепринятые коэффициенты – 0,5, 0,8 соответственно.

В составе материнского полога спелого черничного сосняка преобладает сосна (9С1Б). Средняя высота деревьев и диаметр стволов на высоте 1,3 м составляют 27,5 м и 30,5 см для сосны и 20,5 м и 17,3 см для березы соответственно. Сосновый древостой имеет высокую производительность (I класс бонитета) при относительной полноте 0,6 и запасе древесины 304 м³/га. Сосновый подрост, сформировавшийся под пологом спелого древостоя, в основном объединяется в группы, располагающиеся в окнах в пологе материнского древостоя. Густота подроста составляет 1710 шт./га.

Показатели структуры древесины. Для определения показателей структуры ксилемы в конце августа 2019 г. на каждой ПП с 7 модельных деревьев на высоте 0,2 м заготавливали поперечные спилы древесины ствола. На спилах отмечали стороны света. Из каждого спила отбирали 2 образца, с северной и южной сторон, которые фиксировали в 70%-м растворе этилового спирта. С каждого образца на замораживающем микротоме Frigomobil 1205 (R. Jung, Германия) изготавливали тонкие поперечные срезы древесины, толщиной 15–20 мкм, с последующим окрашиванием 1%-м водным раствором сафранина. Для приготовления временных препаратов в качестве монтирующей среды использовали глицерин. Микрофотографии срезов получали на световом микроскопе AxioImager A1 (Carl Zeiss, Германия) с помощью камеры ADF PRO03 и программы для обработки фотоизображений ADF Image Capture (ADF Optics, Китай) при 10-кратном увеличении.

Анатомическое исследование древесины проводили согласно общепринятым методическим рекомендациям [18, 24]. Для исследования выбрали серию из 4 последовательных годовых колец, сформированных в период 2016–2019 г. На микрофотографиях с помощью программы ImageJ v. 1.50 (NIH, США) измеряли годичный прирост древесины, толщину клеточных стенок и радиальный диаметр люмена клеток ксилемы. Для ранней и поздней зоны прироста подсчитывали число рядов и количество трахеид на единицу площади. Установление показателей макро- и микроструктуры древесины проводили отдельно для северной и южной стороны ствола, затем данные объединяли для каждого дерева. Повторность измерения каждого из показателей составила 50 для 1 дерева. Базисную плотность образцов древесины устанавливали по методике О.И. Полуобяринова путем определения выталкивающей силы [7].

Потенциальную гидравлическую проводимость рассчитывали согласно закону Хагена–Пуазейля [29]:

$$K_n = (\pi \rho_g / 128 \eta) N D_c^4,$$

где ρ_g – плотность воды при 20 °С, $\rho_g = 998,2$ кг/м³; η – вязкость воды при 20 °С, $\eta = 1,002 \cdot 10^{-3}$ Па·с; N – плотность трахеид на единицу площади ксилемы, шт./мм²; D_c – гидравлический диаметр трахеид, мкм.

Гидравлический диаметр рассчитывали как [31]

$$D_c = \left[(\sum d^4) / n \right]^{1/4},$$

где d – диаметр трахеиды, мкм; n – количество измеренных трахеид, шт.

Статистический анализ полученных данных проводили с использованием программы Statistica 10 (StatSoft Inc., США). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$. Для оценки достоверности различий применяли критерий Тьюки.

Результаты исследования и их обсуждение

Меры содействия естественному лесовозобновлению при рубке древостоя оказали положительное влияние на появление подроста сосны последующей генерации. К концу 1-го десятилетия на вырубке сформировался сосново-березовый молодняк с участием сосны 70 %. Для травяно-злаковых вырубок Ленинградской области также получены данные, свидетельствующие о благоприятном воздействии оставления семенных деревьев в сочетании с частичной минерализацией почвы на накопление достаточного количества жизнеспособного подроста сосны, которого к концу 1-го десятилетия после сплошной рубки было 6,6–9,1 тыс. шт./га при средней высоте деревьев до 1,5 м [3]. Также в ряде работ отмечена перспективность мероприятий по минерализации почвы для получения необходимого нормативного числа подроста главных древесных пород при возобновлении участков леса, пройденных сплошными и выборочными рубками [11, 14, 17].

Общеизвестно, что рост по высоте и диаметру являются интегральными показателями интенсивности процессов жизнедеятельности растения, его приспособленности к условиям внешней среды. В ходе предыдущего исследования [27], выполненного на тех же объектах, нами были показаны существенные различия фитоценологических условий между вырубкой и ненарушенным сосняком, что отразилось, в частности, как в 1,5–2 раза меньшая обеспеченность органического горизонта нарушенных почв вырубки общими углеродом, азотом, калием, кальцием и магнием относительно почв сосняка. Микроклиматические условия вырубки в июле за анализируемый период (2016–2019 гг.) отличались более высокими среднедневными интенсивностью фотосинтетически активной радиации (в 5 раз), дефицитом упругости водяного пара (в 1,7 раза), температурами воздуха и почвы (в 1,2 раза) относительно ненарушенного сосняка (240 мкмоль/(м²·с), 1,3 кПа, 22,4 и 13,8 °С соответственно) и схожей влажностью почвы корнеобитаемого слоя на данных участках (10,3–10,5 %). Проведенный нами сравнительный анализ динамики радиального и апикального приростов ствола у подроста сосны в антропогенно трансформированной и естественной среде сосняка показал (рис. 2), что на вырубке, в условиях хорошей освещенности и более высоких температур воздуха и почвы, происходит более интенсивный

рост сосны в высоту, которая уже в 6-летнем возрасте перешла в категорию крупного подростка, достигнув высоты более 1,5 м. Подрост под пологом 95-летнего сосняка возможно было включить в данную категорию лишь в 15 лет. Диаметр стволиков подростка сосны на вырубке на высоте 0,2 м на момент исследования более чем в 2 раза превосходил данный показатель у подростка сосны под пологом материнского древостоя.

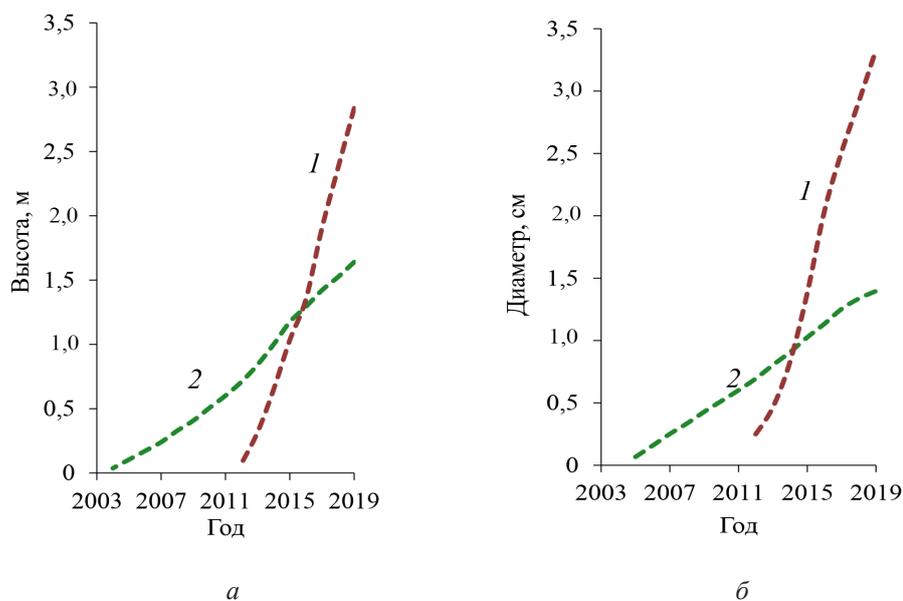


Рис. 2. Ход роста модельных деревьев сосны обыкновенной по высоте (а) и диаметру на высоте у шейки корня (0,2 м) (б) на 10-летней вырубке (1) и под пологом 95-летнего черничного сосняка (2)

Fig. 2. The growth course of sample Scots pine trees in height (a) and diameter at the height of the root collar (0.2 m) (б) in a 10-year-old felling area (1) and under the canopy of a 95-year-old blueberry pine forest (2)

Этот факт, очевидно, обусловлен высокой камбиальной активностью [31] вследствие достаточной обеспеченности дифференцирующихся клеток древесины фотоассимилятами, поступающими из физиологически активной части кроны, что хорошо согласуется с нашими данными о максимальных интенсивности фотосинтеза и транспирации, а также повышенной устьичной проводимости у подростка сосны на вырубке за анализируемый период [27]. При этом у подростка сосны под пологом леса отмечены меньшие устьичная проводимость, интенсивность фотосинтеза и транспирации – на 45, 25 и 39 % соответственно. Вероятно, угнетение ростовой активности подростка сосны под пологом леса в целом связано с более высокой внутривидовой конкуренцией за свет, почвенную влагу и питательные вещества со стороны господствующего полога соснового древостоя. Свидетельством этого также могут служить зафиксированные нами ранее [27] меньшие коэффициенты биологического поглощения азота, калия, кальция и магния в хвое подростка сосны под пологом леса относительно вырубки.

Сопоставление структурных характеристик древесины, сформировавшейся в 2016–2019 гг., у молодого поколения сосны, произрастающего на вырубке и

под пологом спелого сосняка, выявило значительное воздействие условий местообитания на камбиальную активность и формирование элементов ксилемы. Так, на вырубке у подростка сосны за исследуемый период ширина годичных колец была в 5 раз больше (табл. 2), чем у молодого соснового поколения под пологом леса. Кроме того, у сосны, растущей на освещенной открытой вырубке, число рядов трахеид ранней и поздней древесины было выше соответственно в 8 и 3 раза по сравнению с подростом сосны, сформировавшимся под пологом леса. Это послужило причиной увеличения ширины годичных колец у сосны в условиях антропогенно трансформированного фитоценоза. При этом уменьшение ширины годичного кольца у деревьев под пологом леса вследствие угнетения энергии прироста клеток ксилемы приводит, напротив, к повышению доли поздней древесины (43 %) относительно доли таковой на вырубке (33 %).

Таблица 2

Средние многолетние (\pm ошибка) за период наблюдений показатели ксилемы ствола подростка сосны на вырубке и под пологом черничного сосняка
The average long-term (\pm error) values of the xylem of pine undergrowth stem over the observation period in the felling area and under the canopy of a blueberry pine forest

Показатель	Вырубка	Полог леса
Ширина годичного слоя, мм	2,4 \pm 0,3	0,5 \pm 0,1
Число рядов ранних трахеид, шт.	45,8 \pm 1,5	5,9 \pm 0,2
Число рядов поздних трахеид, шт.	23,7 \pm 0,5	7,7 \pm 0,3
Доля поздней ксилемы, %	33 \pm 0,5	43 \pm 0,4
Базисная плотность древесины, кг/м ³	359 \pm 10,5	529 \pm 8,9
Потенциальная гидравлическая проводимость, кг/(м·МПа·с)	161,4 \pm 3,4	83,0 \pm 2,2

Примечание: Средние значения каждого признака на исследуемых ПП статистически достоверно различаются внутри вида.

Условная плотность древесины у подростка на вырубке была в 1,5 раза ниже в сравнении с подпологовым подростом, но в целом такое соотношение характерно для роста сосны в ювенильном периоде развития [2, 16]. Вместе с тем меньшие доля поздней древесины и плотность древесины у деревьев на вырубке обеспечивают им превосходящую гидравлическую эффективность ксилемы, свидетельством которой является в 2 раза более высокая потенциальная гидравлическая проводимость. Эти данные соответствуют ранее полученным нами сведениям о хороших интенсивности транспирации и устьичной проводимости у сосны на вырубке по сравнению с сосной под пологом материнского древостоя [27].

Эффективность водопроводящей функции древесины зависит как от длины проводящего элемента и диаметра его люмена, так и от количества и структурных особенностей пор, связывающих трахеиды [30, 33]. При большей длине проводящего элемента вода проходит через поры меньшее количество раз, что снижает общее гидравлическое сопротивление ксилемы [20]. Однако с увеличением диаметра проводящих элементов у хвойных и лиственных пород повышается риск эмболии [19, 23] – причины снижения конкурентоспособности деревьев с большими проводящими элементами во время заморозков

и продолжительных периодов водного дефицита. Древесина хвойных пород относительно лиственных имеет более универсальное строение, характеризующееся крупными тонкостенными трахеидами ранней древесины, выполняющими эффективный гидравлический транспорт, и более мелкими толстостенными трахеидами поздней древесины, определяющими в большей степени ее механическую прочность [22]. Есть предположение, что различия в размерах ранних и поздних трахеид обеспечивают хвойным видам адаптацию к различным условиям окружающей среды, особенно к заморозкам и засухе [34]. Важно отметить, что в районе проведения исследования в течение 4 вегетационных периодов (2016–2019 гг.) почвенных засух не наблюдалось. Условия увлажнения в эти отрезки времени отличались чередованием влажных (490 мм) и более засушливых периодов (250 мм). Относительно засушливые условия наблюдали в начале вегетационных периодов 2018 и 2019 гг. [27]. Температурный режим вегетационного периода 2016–2019 гг. отличался чередованием ($0,9 \leq \Delta T \leq 2,1$, ΔT – средняя температура, °C) более теплых (2016 и 2018 гг.) и холодных (2017 и 2019 гг.) сезонов.

Проведенный нами сравнительный анализ характеристик ранних и поздних трахеид ксилемы для 4 последовательных годовичных колец, сформированных в период 2016–2019 гг., выявил их схожие изменения (рис. 3, 4).

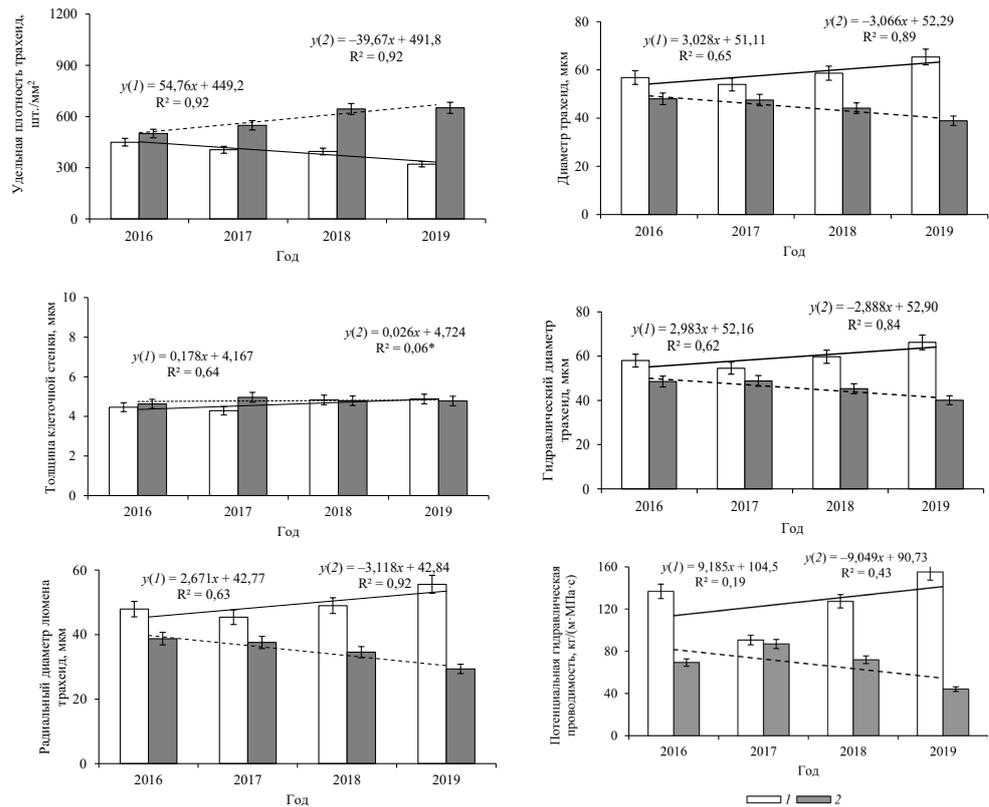


Рис. 3. Межгодовая изменчивость структурно-функциональных характеристик ранней древесины ствола модельных деревьев сосны на вырубке (1) и под пологом спелого черничного сосняка (2) (* – зависимость незначительна, $p > 0,05$)

Fig. 3. The interannual variability of the structural and functional characteristics of early wood of the stems of sample Scots pine trees in the felling area (1) and under the canopy of a mature blueberry pine forest (2) (* – the dependency is insignificant, $p > 0,05$)

Так, у сосны на вырубке выявлено существенное снижение плотности на единицу площади ксилемы как ранних ($R^2 = 0,92$, $p < 0,05$), так и поздних ($R^2 = 0,54$, $p < 0,05$) трахеид в серии годовых колец за отмеченный 4-летний период. У молодого поколения сосны под пологом леса, напротив, установлено ощутимое увеличение плотности ранних ($R^2 = 0,92$, $p < 0,05$) и поздних ($R^2 = 0,94$, $p < 0,05$) трахеид. Однако в остальных случаях у подростка сосны под пологом сосняка как для ранних, так и для поздних клеток ксилемы отмечено снижение диаметра трахеид ($R^2 = 0,89-0,93$), диаметра люмена ($R^2 = 0,92-0,94$), гидравлического диаметра ($R^2 = 0,84-0,92$) и потенциальной гидравлической проводимости ($R^2 = 0,43-0,85$), при $p < 0,05$ для каждого значения. Факт снижения перечисленных показателей в зоне как ранней, так и поздней древесины у подростка сосны под пологом леса, вероятно, свидетельствует об угнетении ростовой активности в целом вследствие отмеченной ранее высокой внутривидовой конкуренции. При этом у деревьев сосны на вырубке, на фоне достоверного увеличения диаметров люмена и трахеид, гидравлического диаметра и потенциальной гидравлической проводимости в зоне ранних трахеид, происходит некоторое снижение отмеченных показателей в зоне поздней древесины, что свидетельствует об ожидаемом доминировании механической функции трахеид над водопроведением в зоне поздней древесины [22].

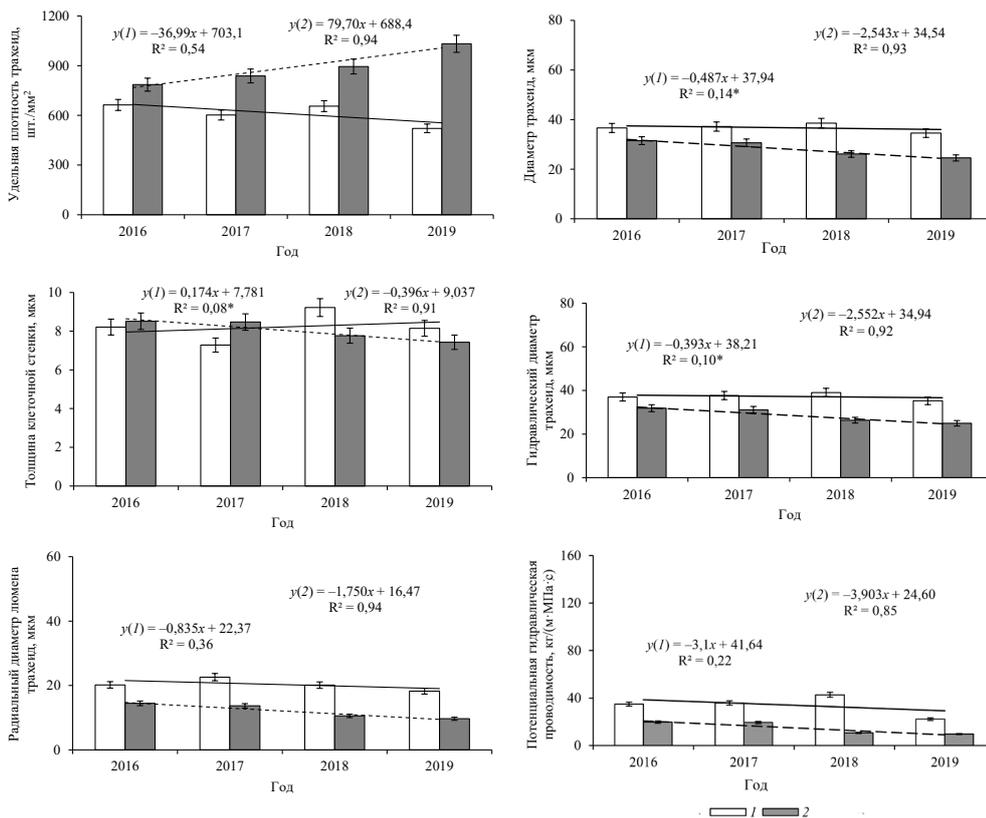


Рис. 4. Межгодовая изменчивость структурно-функциональных характеристик поздней древесины ствола молодого поколения сосны на вырубке (1) и под пологом спелого черничного сосняка (2) (* – зависимость незначительна, $p > 0,05$)

Fig. 4. The interannual variability of the structural and functional characteristics of late wood of the stem of a young generation of pine in the felling area (1) and under the canopy of a mature blueberry pine forest (2) (* – the dependency is insignificant, $p > 0.05$)

В большинстве случаев в межгодовой динамике более строгие линейные регрессионные зависимости структурных характеристик для ранних и поздних трахеид отмечены у деревьев сосны под пологом леса относительно деревьев на вырубке. Исключение составила толщина клеточной стенки ранних трахеид ксилемы деревьев сосны под пологом леса, для которой не выявлено значимых изменений ($R^2 = 0,06$, $p > 0,05$).

Несмотря на полифункциональность древесины, ее основным назначением является снабжение тканей и органов дерева водой и растворенными в ней веществами [26]. Увеличение диаметра люмена ранних клеток ксилемы сосны на вырубке при интенсивной освещенности, очевидно, связано с активизацией процессов роста клеток растяжением [22, 32]. Более высокое по сравнению с условиями на вырубке количество клеток ксилемы на единицу площади древесины у сосны под пологом леса можно объяснить реакцией компенсаторного характера на снижение гидравлической проводимости древесины. Способность растений к регуляции числа и диаметров элементов ксилемы играет важную роль в адаптации организма к условиям произрастания. Более широкие структурные элементы ксилемы лучше выполняют водопроводящие функции, в то время как более мелкие трахеиды меньше подвержены эмболии [22, 34]. В целом увеличение гидравлической проводимости древесины ствола сосен на вырубке оказывает положительное влияние на $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -газообмен хвои, что хорошо согласуется с ранее полученными нами данными [27]. Этот факт, очевидно, свидетельствует о большем соответствии условий внешней среды на вырубке оптимуму для роста и развития молодых деревьев сосны по сравнению с условиями под пологом спелого соснового древостоя.

Заключение

Результаты проведенного исследования показывают, что меры содействия естественному возобновлению леса посредством оставления семенных деревьев и частичной минерализации почвы в условиях зеленомошной группы типов леса в среднетаежных сосняках с лесоводственной точки зрения являются эффективным способом лесовозобновления на вырубках ценными хвойными породами. Уже к концу 1-го десятилетия происходит формирование покрытой лесом площади с преобладанием в составе молодняков соснового элемента леса, отличающегося активным ростом по высоте и диаметру. Анализ внутривидовой изменчивости анатомических и гидравлических характеристик ксилемы сосны в ходе естественного лесовосстановления на вырубке выявил высокую адаптацию исследуемых признаков к изменениям факторов внешней среды. Полученные значения структурно-функциональных характеристик древесины сосны обыкновенной могут быть применены как параметрические входные данные для имитационного математического моделирования продукционного процесса и водного цикла сосновых сообществ таежной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ананьев В.А., Карпин В.А., Кравченко А.В., Курхинен Ю.П., Левина М.С., Литинская Н.Л., Мошиников С.А., Петров Н.В., Потахин С.Б., Предтеченская О.О., Преснухин Ю.В., Руоколайнен А.В., Сазонов С.В., Тимофеева В.В., Туонен А.В., Шорохова Е.В., Kerkelä L. Леса и их многоцелевое использование на северо-западе европейской части таежной зоны России / под ред. А.Н. Громцева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 190 с.

Anan'yev V.A., Karpin V.A., Kravchenko A.V., Kurkhhin Yu.P., Levina M.S., Litinskaya N.L., Moshnikov S.A., Petrov N.V., Potakhin S.B., Predtechenskaya O.O., Presnukhin Yu.V., Ruokolainen A.V., Sazonov S.V., Timofeeva V.V., Tuyunen A.V., Shorokhova E.V., Kerkelä L. *Forest and Their Multipurpose Use in the North-West of the European Part of the Taiga Zone of Russia*. Ed. By A.N. Gromtsev. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the RAS Publ., 2015. 190 p. (In Russ.).

2. Бахшиева М.А., Чубинский А.Н. Анализ строения и свойств ювенильной древесины на качество пиломатериалов // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 215. С. 202–214.

Bakhshieva M.A., Chubinsky A.N. Analysis of Juvenile Wood Structure and Properties Influence upon Lumber Quality. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2016, iss. 215, pp. 202–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.202-214>

3. Беляева Н.В., Нойкина А.М. Успешность естественного возобновления сосны на вырубках в зависимости от типа леса // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2008. № 21-3. С. 6–13.

Beliaeva N.V., Noikina A.M. The Success of Natural Regeneration of Pine in Cleared Areas Depending on the Forest Type. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2008, no. 21-3, pp. 6–13. (In Russ.).

4. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 г. / М-во природ. ресурсов и экологии Респ. Карелия. Ред. кол.: А.Н. Громцев (гл. ред.), О.Л. Кузнецов, А.Е. Курило, Е.В. Веденцова. Петрозаводск, 2021. 277 с.

State Report on the State of the Environment in the Republic of Karelia in 2020. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Karelia. Ed. Board: A.N. Gromtsev (ed.-in-chief), O.L. Kuznetsov, A.E. Kurilo, E.V. Vedentsova. Petrozavodsk, 2021. 277 p. (In Russ.).

5. Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: АГТУ, 2003. 110 с.

Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Quality of Pine Wood in Crops*. Arkhangel'sk, ASTU Publ., 2003. 110 p. (In Russ.).

6. Неронова Я.А. Микроструктура древесины культур сосны различной исходной густоты на осушенной торфяной почве после применения удобрений и гербицидов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 68–76.

Neronova Ya.A. Wood Microstructure of Pine Plantations with Different Initial Stocking Rate on Drained Peat Soil upon Fertilization and Herbicide Treatments. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 4, pp. 68–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-68-76>

7. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с. Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p. (In Russ.).

8. Придача В.Б., Ольчев А.В., Сазонова Т.А., Тихова Г.П. Параметры CO₂/H₂O-обмена древесных растений как инструмент мониторинга и оценки состояния природной среды // Успехи соврем. естествознания. 2019. № 11. С. 25–30.

Pridacha V.B., Olchev A.V., Sazonova T.A., Tikhova G.P. Parameters of CO₂/H₂O-Exchange in Woody Plants as an Instrument to Monitor and Evaluate Environmental Conditions. *Uspekhi sovremenno ego estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 2019, no. 11, pp. 25–30. (In Russ.).

9. Придача В.Б., Сазонова Т.А. Возрастные изменения содержания и соотношения азота, фосфора и калия в органах *Pinus sylvestris* и *Picea abies* (Pinaceae) // Ботан. журн. 2004. Т. 89, № 9. С. 1486–1496.

Pridacha V.B., Sazonova T.A. Age Changes and Ratio of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Contents in the Organs of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* (Pinaceae). *Botanicheskij Zhurnal*, 2004, vol. 89, no. 9, pp. 1486–1496. (In Russ.).

10. Придача В.Б., Тихова Г.П., Сазонова Т.А. Влияние абиотических факторов на водообмен хвойного и лиственного растений // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 12. С. 76–86.

Pridacha V.B., Tikhova G.P., Sazonova T.A. The Effect of Abiotic Factors on Water Exchange in Coniferous and Deciduous Plants. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = Transactions of KarRC RAS, 2018, no. 12, pp. 76–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb878>

11. Рай С.А., Беляева Н.В., Наквасина Е.Н. Формирование древесного яруса и напочвенного покрова на вырубках с разной технологией лесовосстановления в Кировской области // Изв. СПбЛТА. 2020. Вып. 230. С. 36–53.

Rai S.A., Beliaeva N.V., Nakvasina E.N. The Initial Stages of Succession in Cutting Areas with Different Technologies for Reforestation in the Kirov Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, iss. 230, pp. 36–53. (In Russ.).

12. Сазонова Т.А., Болондинский В.К., Придача В.Б. Влияние водного дефицита хвои сосны обыкновенной на фотосинтез в условиях достаточного почвенного увлажнения // Лесоведение. 2017. № 4. С. 311–318.

Sazonova T.A., Bolondinskij V.K., Pridacha V.B. The Effect of Water Deficit in Needles on Photosynthesis of the Scots Pine under Normal Soil Moistening. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2017, no. 4, pp. 311–318. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0024114817040076>

13. Сазонова Т.А., Придача В.Б. Содержание минеральных элементов в органах сосны и ели при варьировании почвенных условий // Лесоведение. 2005. № 5. С. 25–31.

Sazonova T.A., Pridacha V.B. Mineral Nutrient Contents in Pine and Spruce Organs under Different Soil Conditions. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2005, no. 5, pp. 25–31. (In Russ.).

14. Санников С.Н., Санников Д.С. Система рубок и возобновления сосновых лесов на эколого-генеогеографической основе // Сиб. лесн. журн. 2015. № 6. С. 3–16.

Sannikov S.N., Sannikov D.S. Felling-System and Regeneration of Pine Forests on Ecological-Genetic-Geographical Basis. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 6, pp. 3–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150601>

15. Соколов А.И. Повышение ресурсного потенциала таежных лесов лесокультурным методом. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 178 с.

Sokolov A.I. *Increasing the Resource Potential of Taiga Forests Using the Silvicultural Method*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2016. 178 p. (In Russ.).

16. Уголев В.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. 4-е изд. М.: МГУЛ, 2001. 340 с.

Ugolev V.N. *Wood Science with the Basics of Forest Commodity Science*. 4th ed. Moscow, MSFU Publ., 2001. 340 p. (In Russ.).

17. Фетисова А.А., Грязькин А.В., Ковалев Н.В., Гуталь М. Оценка естественного возобновления хвойных пород на сплошных вырубках в условиях Рошчинского лесничества // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 6. С. 9–18.

Fetisova A.A., Gryazkin A.V., Kovalev N.V., Gutal M. Assessment of Natural Conifer Regeneration in the Clear Cutting Area of the Roshchino Forestry. *Lesnoj Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 6, pp. 9–18. (In Russ.).

18. Яценко-Хмелевский А.А. Основы и методы анатомического исследования древесины. М.; Л.: АН СССР, 1954. 337 с.

Yatsenko-Khmelevskiy A.A. *The Fundamentals and Methods of Wood Anatomical Examination*. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1954. 337 p. (In Russ.).

19. Bouche P.S., Larter M., Domec J.-C., Burlett R., Gasson P., Jansen S., Delzon S. A Broad Survey of Hydraulic and Mechanical Safety in the Xylem of Conifers. *Journal of Experimental Botany*, 2014, vol. 65, iss. 15, pp. 4419–4431. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru218>

20. Choat B., Cobb A.R., Jansen S. Structure and Function of Bordered Pits: New Discoveries and Impacts on Whole-Plant Hydraulic Function. *New Phytologist*, 2008, vol. 177, iss. 3, pp. 608–626. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02317.x>

21. Fonti P., Jansen S. Xylem Plasticity in Response to Climate. *New Phytologist*, 2012, vol. 195, iss. 4, pp. 734–736. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04252.x>
22. *Functional and Ecological Xylem Anatomy*. Ed. by U.G. Hacke. Springer, Cham, 2015. 281 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15783-2>
23. Hacke U.G., Spicer R., Schreiber S.G., Plavcová L. An Ecophysiological and Developmental Perspective on Variation in Vessel Diameter. *Plant Cell & Environment*, 2017, vol. 40, iss. 6, pp. 831–845. <https://doi.org/10.1111/pce.12777>
24. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. *IAWA Bulletin n.s.*, 1989, vol. 10(3), pp. 219–332.
25. Mörling T. Evaluation of Annual Ring Width and Ring Density Development Following Fertilisation and Thinning of Scots Pine. *Annals of Forest Science*, 2002, vol. 59, no. 1, pp. 29–40. <https://doi.org/10.1051/forest:2001003>
26. *Plant Stems: Physiology and Functional Morphology*. Ed. by B.L. Gartner. San Diego, Academic Press, 1995. 440 p.
27. Pridacha V.B., Sazonova T.A., Novichonok E.V., Semin D.E., Tkachenko Yu.N., Pekkoev A.N., Timofeeva V.V., Bakhmet O.N., Olchev A.V. Clear-Cutting Impacts Nutrient, Carbon and Water Exchange Parameters in Woody Plants in an East Fennoscandian Pine Forest. *Plant and Soil*, 2021, vol. 466, pp. 317–336. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05058-w>
28. Steppe K., Sterck F., Deslauriers A. Diel Growth Dynamics in Tree Stems: Linking Anatomy and Ecophysiology. *Trends in Plant Science*, 2015, vol. 20, iss. 6, pp. 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.03.015>
29. Sterck F.J., Zweifel R., Sass-Klaassen U., Chowdhury Q. Persisting Soil Drought Reduces Leaf Specific Conductivity in Scots Pine (*Pinus sylvestris*) and Pubescent Oak (*Quercus pubescens*). *Tree Physiology*, 2008, vol. 28, iss. 4, pp. 529–536. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.4.529>
30. Sviderskaya I.V., Vaganov E.A., Fonti M.V., Fonti P. Isometric Scaling to Model Water Transport in Conifer Tree Rings across Time and Environments. *Journal of Experimental Botany*, 2021, vol. 72, iss. 7, pp. 2672–2685. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa595>
31. Tyree M.T., Zimmermann M.H. *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. 2nd ed. Heidelberg, Springer Berlin, 2002. 284 p.
32. Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings. Images of Past and Future Environments*. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2006. 358 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-31298-6>
33. Venturas M.D., Sperry J.S., Hacke U.G. Plant Xylem Hydraulics: What We Understand, Current Research, and Future Challenges. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2017, vol. 59, iss. 6, spec. iss.: Plant vascular biology (2), pp. 356–389. <https://doi.org/10.1111/jipb.12534>
34. Zheng J., Li Y., Morris H., Vandellook F., Jansen S. Variation in Tracheid Dimensions of Conifer Xylem Reveals Evidence of Adaptation to Environmental Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, art. no. 774241. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.774241>

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

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-106-118

Применение методов пространственного анализа при оценке степени горимости лесов Хабаровского края

А.В. Остроухов, канд. геогр. наук; ResearcherID: [G-1297-2018](https://orcid.org/0000-0002-9203-9097),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9097>

Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН, ул. Дикопольцева, д. 56, г. Хабаровск, Россия, 680000; Ostran2004@bk.ru

Поступила в редакцию 19.04.22 / Одобрена после рецензирования 20.07.22 / Принята к печати 26.07.22

Аннотация. Лесные пожары являются доминирующим фактором трансформации природных ландшафтов бореальной зоны. Территория Хабаровского края, 93,6 % которой относится к землям лесного фонда, в настоящее время имеет лесистость лишь 66,5 %, что во многом связано с лесными пожарами. Это делает актуальной проблему снижения горимости лесов на территории края, в т. ч. в аспекте оценки фактической горимости для прогнозирования рисков возникновения ландшафтных пожаров. В статье показаны возможности применения методов пространственного анализа модуля Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS 10.8 для оценки степени фактической горимости лесов на основе расчета показателей числа пожаров на 1 млн и 250 тыс. га и площади пожаров на 1000 га для скользящего окна заданного размера. На основе данных Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства за 2000–2020 гг. и данных о количестве возгораний с сайта Fire Information for Resource Management System за 2000–2021 гг. выполнена оценка фактической горимости для Хабаровского края. Анализ результатов отражает высокую пространственную и сезонную неоднородность распространения ландшафтных пожаров на территории и их приуроченность к объектам транспортной и селитебной структуры. Области с высокой горимостью часто не совпадают с границами лесхозов, а максимальные показатели характерны для нелесных территорий, не попадающих в лесохозяйственную статистику. Для разных сезонов года наряду с количественными различиями наблюдаются и пространственные сдвиги точек возгораний и областей с их высокой плотностью. Большая часть земель края (88,3 %) относится к низкой и ниже средней категориям горимости, что связано прежде всего со слабой степенью освоенности этих площадей. Выполненная оценка степени горимости территории на основе годовых и сезонных карт плотности точек возгорания, рассчитанных по методу скользящего окна, позволяет достаточно объективно и детально отразить среднесрочный риск возникновения пожара вне привязки к лесохозяйственным границам. В сочетании с картой распределения лесов по классам природной пожарной опасности по пирологическим характеристикам результаты исследования могут стать основой для расчета фонового пожарного риска, отражающего вероятность возникновения и развития пожара.

Ключевые слова: лесные пожары, фактическая горимость лесов, площадь пожара, частота пожара, Хабаровский край, методы пространственного анализа



Для цитирования: Остроухов А.В. Применение методов пространственного анализа при оценке степени горимости лесов Хабаровского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 106–118. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-106-118>

Original article

The Use of Spatial Analysis Methods in Assessing the Degree of Fire Frequency in Forests of the Khabarovsk Territory

Andrey V. Ostroukhov, Candidate of Geography; ResearcherID: [G-1297-2018](https://orcid.org/0000-0002-9203-9097),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9097>

Institute of Water and Ecology Problems of the Far Eastern Branch of the RAS, ul. Dikopoltseva, 56, Khabarovsk, Khabarovsk Territory, 680000, Russian Federation; Ostran2004@bk.ru

Received on April 19, 2022 / Approved after reviewing on July 20, 2022 / Accepted on July 26, 2022

Abstract. Forest fires are the dominant factor in the transformation of natural landscapes in the boreal zone. The area of the Khabarovsk Territory, 93.6 % of which belongs to the forest fund lands, currently has a forest cover of only 66.5 %, which is largely due to forest fires. This makes urgent the problem of reducing the forest fire frequency in the region, including in terms of assessing the actual fire frequency for predicting the risks of landscape fires. The article shows the possibilities of using spatial analysis methods of the Spatial Analyst module of the ArcGIS 10.8 software package to assess the degree of actual forest fire frequency based on calculating the number of fires per 1 million and 250 thousand ha and the area of fires per 1000 ha for a sliding window of a given size. Based on the data from the Remote Monitoring Information System of the Federal Forestry Agency for 2000–2020 and the data on the number of fires from the Fire Information for Resource Management System website for 2000–2021, an assessment of the actual fire frequency for the Khabarovsk Territory has been carried out. The analysis of the results reflects the high spatial and seasonal heterogeneity of the spread of landscape fires in the territory and their proximity to transport and residential structures. Areas with high fire frequency often do not coincide with the boundaries of forestry enterprises, and the maximum indicators are typical for non-forest areas that are not covered by forestry statistics. For different seasons of the year, along with quantitative differences, spatial shifts of firing points and areas with their high density are also observed. Most of the lands in the region (88.3 %) in terms of fire danger belong to the “low” and “below medium” fire frequency categories, which is primarily due to the low degree of development of these areas. The assessment of the degree of fire frequency in the territory on the basis of annual and seasonal maps of the density of firing points, calculated using the sliding window method, makes it possible to fairly objectively and in detail reflect the average long-term risk of fire occurrence outside of reference to forestry boundaries. In combination with a map of the distribution of forests by natural fire hazard classes based on pyrological characteristics, the results of the research can become the basis for calculating the background fire risk, reflecting the risk of fire occurrence and development.

Keywords: forest fires, actual forest fire frequency, fire area, fire occurrence, the Khabarovsk Territory, spatial analysis methods

For citation: Ostroukhov A.V. The Use of Spatial Analysis Methods in Assessing the Degree of Fire Frequency in Forests of the Khabarovsk Territory. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 106–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-106-118>



Введение

Лесные пожары в настоящее время являются одним из основных факторов трансформации природных ландшафтов бореальной зоны. Различным аспектам данной проблемы посвящено большое количество работ: по лесопожарному районированию [2, 7], по влиянию лесных пожаров на компоненты насаждений и особенно на древостой [10, 12]. Внимание в научных публикациях уделяется также совершенствованию тушения лесных пожаров [3, 6]. Одним из важных аспектов разработки эффективной системы охраны лесов от пожаров является, по мнению ряда авторов, детальный анализ показателей фактической горимости лесов за длительный период, поскольку данные за короткий период часто субъективны и не в полной мере характеризуют динамику горимости лесов [1, 9, 11]. Полученная на основе анализа многолетних данных о количестве обнаруженных пожаров характеристика фактической горимости территории на единицу площади – важная информация для предотвращения лесных пожаров [16], их локализации, оценки экономических, экологических и социальных рисков [13, 17]. Развитие технологий дистанционного зондирования сделало возможным получение более детальных и пространственно полных характеристик территорий по пожарной опасности в различных аспектах [15, 18]. По мнению В.Г. Гусева, «только она [технология дистанционного зондирования] и может служить объективной основой шкалы пожарной опасности лесов» [1, с. 41].

Хабаровский край, являясь одним из крупнейших субъектов Российской Федерации, имеет площадь 787 633 км², из которых 93,6 % относятся к землям лесного фонда [8], при этом лесистость территории составляет 66,5 %, такой относительно низкий показатель связан в т. ч. с лесными пожарами. Так, в 2019 г. заготовка древесины осуществлялась на площади 88 тыс. га, тогда как площадь лесов, пройденная огнем, составила 300 тыс. га. Таким образом, проблема снижения горимости лесов края, включая оценку фактической горимости для прогнозирования рисков возникновения лесных пожаров, остается актуальной.

Целью настоящей статьи является анализ возможности применения методов пространственного анализа для оценки степени горимости территории Хабаровского края и ее картографического представления.

Объекты и методы исследования

Для оценки фактической горимости лесов в настоящее время используется шкала, разработанная институтом «Росгипролес» [5], основанная на 2 показателях: число пожаров на 1 млн га и пройденная огнем площадь на 1000 га общей площади характеризуемого лесохозяйственного объекта (табл. 1).

Таблица 1

**Шкала оценки фактической горимости лесов [5]
The scale for assessing the actual forest fire frequency [5]**

Средняя абсолютная горимость		Относительная горимость
по количеству пожаров на 1 млн га, случаев в год	по средней площади пожаров на 1000 га, га	
Менее 5	Менее 0,1	Низкая
5–20	0,1–0,5	Ниже средней
21–50	0,51–1,0	Средняя
51–100	1,01–1,5	Выше средней
101–200	1,51–3,0	Высокая
201 и более	Более 3,0	Чрезвычайная

Горимость лесов Хабаровского края (по статистическим данным) остается одной из самых высоких в России. Крупномасштабные лесные пожары повторялись здесь с 22-летней периодичностью: в 1932, 1954, 1976, 1998 гг. В настоящее время всплески горимости отмечаются чаще (периодичность – 3–8 лет), однако с меньшим охватом площади – 2009, 2012, 2018 гг. Относительная горимость по количеству пожаров на 1 млн га в целом по краю ниже средней (5 пожаров/млн га), по площади пожаров – чрезвычайная (3,75 га на 1000 га лесных земель) [8]. При рассмотрении горимости территории в границах отдельных лесничеств наблюдается очень большой диапазон значений – от 0 до 109 пожаров/млн га и от 0,20 до 95,32 га/1000 га. В целом по количеству пожаров на 1 млн га большая часть лесничеств края относится к категориям горимости ниже средней (34,9 %) и низкой (62,9 %), по площади пожаров 44 % территории лесного фонда характеризуются горимостью ниже средней, но при этом 28,2 % – чрезвычайной (табл. 2).

Таблица 2

Распределение территории Хабаровского края по показателям фактической горимости лесов при расчете в границах лесничеств (по [8])
The distribution of the Khabarovsk Territory area by indicators of actual forest fire frequency when calculated within the boundaries of forestries (by [8])

Количество пожаров на 1 млн га, случаев в год	Доля от площади лесного фонда, %	Средняя площадь пожаров на 1000 га	Доля от площади лесного фонда, %
Менее 5	62,9	Менее 0,1	13,1
5–20	34,9	0,1–0,5	44,8
21–50	1,8	0,51–1,0	4,3
51–100	0,3	1,01–1,5	4,1
101–200	0,1	1,51–3,0	5,5
201 и более	0	Более 3,0	28,2

При анализе исследований, выполненных специалистами лесной отрасли, необходимо принимать во внимание, что в качестве исходной территориальной единицы в лесохозяйственных работах приняты лесничества. Они рассматриваются как наименьшая самостоятельная производственная единица, в рамках которой ведется планирование, выполнение и учет всех лесохозяйственных показателей. К лесничествам приурочены лесоводственно-таксационные и хозяйственные характеристики, а также сведения о горимости лесов. В результате статистические и расчетные показатели горимости, площадей пожаров и др. представлены для территорий отдельных лесничеств, которые занимают значительную площадь и зачастую крайне неоднородны по растительному покрову, рельефу, плотности населения и развитости инфраструктуры. Однако большое число возгораний происходит на землях, не относящихся к лесному фонду (земли государственного запаса, министерства обороны, особо охраняемые природные территории и др.), и поэтому не принимается во внимание при расчетах. Например, в пределах Среднеамурской низменности большие площади земель не являются землями лесничеств, тогда как именно на них часто возникают пожары (рис. 1). В итоге при расчете количества возгораний на 1 млн га эти возгорания не учитываются.

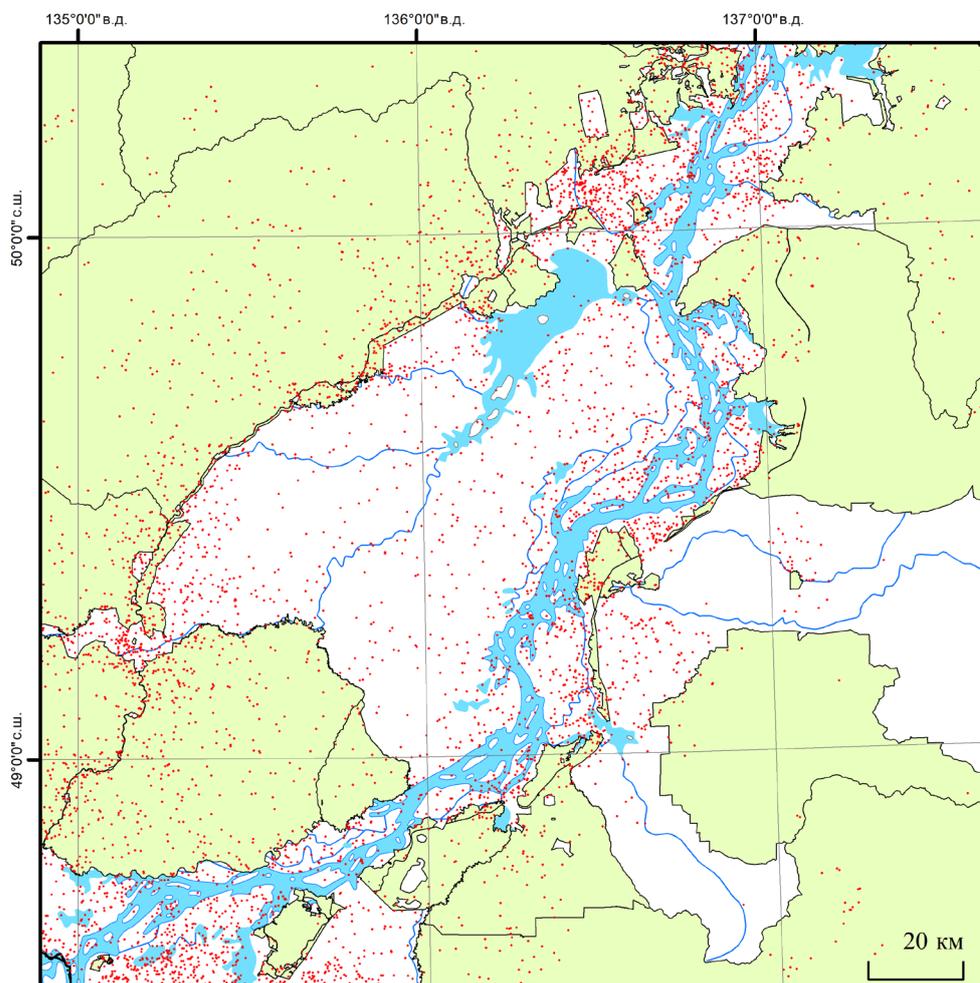
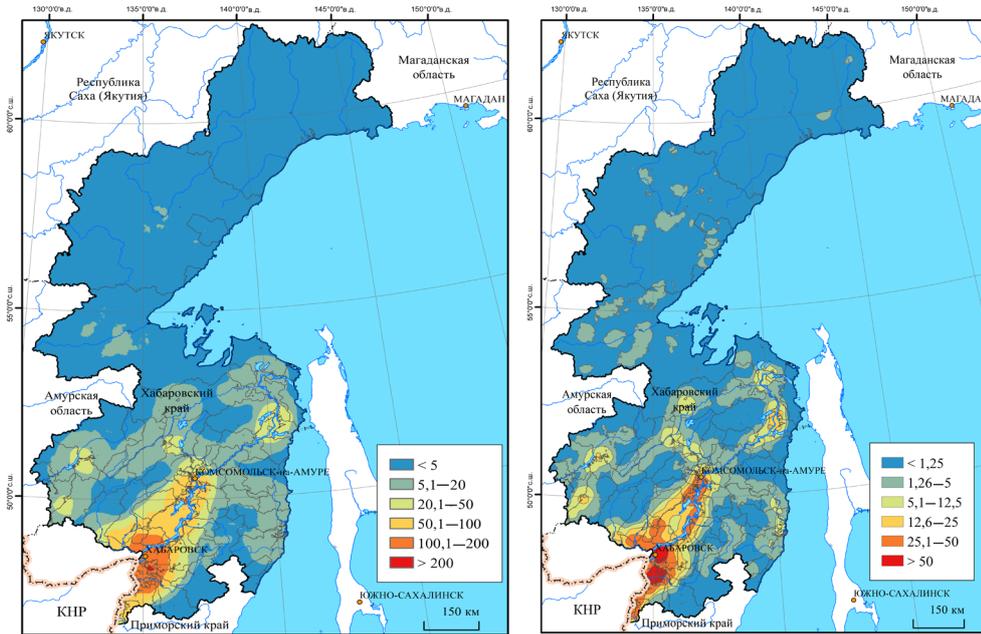


Рис. 1. Точки возгораний на территории Среднеамурской низменности за 2000–2020 гг. по данным [4]. Светло зеленый – земли лесного фонда

Fig. 1. The firing points in the territory of the Middle Amur Lowland for 2000–2020 according to the data of [4]. Light green – forest fund lands

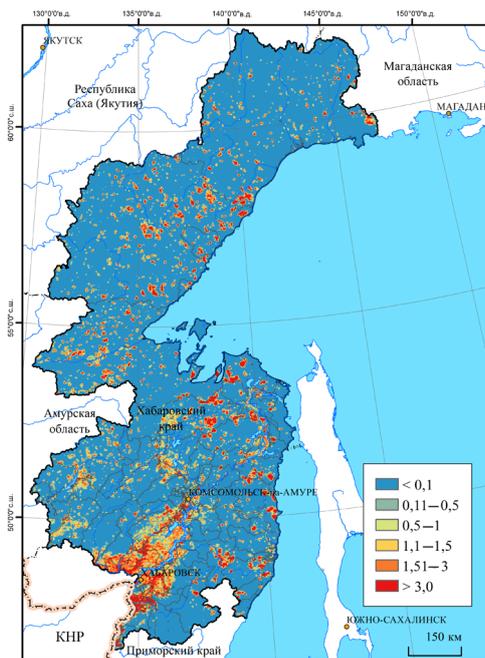
Альтернативный способ характеристики горимости – выполненный нами расчет количества возгораний в ячейке (точке) растровой поверхности методом скользящего окна, при котором вычисляется количество возгораний в заданном радиусе, соответствующем площади круга 1 млн (рис. 2, *a*) и 250 тыс. га (рис. 2, *б*). Как показывает сравнение рисунков, скользящее окно размером 250 тыс. га позволяет подходить к оценке рисков возгораний более дифференцированно, тогда как при более крупном размере окна локальные различия сглаживаются.

Для оценки плотности ландшафтных пожаров использовались данные Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоза) [4] за 2000–2020 гг. В связи с отсутствием свободного доступа к данным о границах пожаров в системе ИСДМ, дополнительно для оценки площадей ландшафтных пожаров взяты данные о количестве возгораний – горячих точек (HS) с сайта Fire Information for Resource Management System (FIRMS) MODIS Collection 6 за 2000–2021 гг. [14].



a

b



v

Рис. 2. Карты горимости территории Хабаровского края по числу пожаров на 1 млн га (*a*), на 250 тыс. га (*b*) и по средней площади пожаров на 1000 га (*v*)

Fig. 2. The fire frequency maps of the Khabarovsk Territory area by the number of fires per 1 mln ha (*a*), per 250 ths ha (*b*) and by the average fire area per 1000 ha (*v*)

Расчеты проводились с помощью инструмента Point Density в модуле Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS 10.8. Получена растровая поверхность с ячейкой 100×100 м с численными значениями плотности точек возникновения и площадей пожаров в заданном радиусе от точки. Для удобства сопоставления с картами по более ранним данным других авторов результаты приведены к шкале, разработанной институтом «Росгипролес» [5].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов показывает пространственную неоднородность распространения ландшафтных пожаров по территории края и их приуроченность к объектам транспортной и селитебной структуры. На рис. 2 видно, что земли с высокой горимостью пространственно не совпадают с границами лесхозов (показаны черными линиями), что подтверждает указанные выше недостатки использования лесохозяйственных границ для оценки пожарных рисков. Даже в пределах лесничеств, отнесенных при расчете в лесохозяйственных границах к территориям с низкой горимостью, выделяется ряд участков со средней и выше средней горимостью.

Сопоставление карты горимости, рассчитанной по методу скользящего окна, с данными о границах лесной растительности показывает, что максимальная горимость характерна для нелесных территорий края, часто не попадающих в лесохозяйственную статистику. Большая часть возгораний происходит вблизи (до 10 км) объектов селитебной и транспортной инфраструктуры, т. е. связана с деятельностью человека. Анализ данных о количестве возгораний и площадях пожаров на покрытых лесом землях выявляет следующую закономерность, отмечаемую и другими исследователями [8]: несмотря на значительное количество возгораний лесов вблизи антропогенных объектов максимальные площади, пройденные пожаром, характерны для слабо освоенных горных и удаленных территорий. Это связано с двумя факторами:

1. Развитая инфраструктура хотя и является потенциальным источником огня, одновременно способствует быстрому обнаружению и оперативному тушению лесных пожаров, что не дает им развиваться и достигнуть больших размеров, в то время как пожары на удаленных, труднодоступных территориях несмотря на то, что могут быть быстро обнаружены (авиационными или космическими методами), достигают больших размеров из-за длительного промежутка времени между обнаружением и началом тушения (такая ситуация характерна для горных южных и центральных районов края).

2. Превосходящая часть удаленных северных территорий края относится к зоне, где тушение лесных пожаров проводится только при угрозе человеческой жизни или социально-экономическим объектам, т. е. при обнаружении лесного пожара он развивается, пока не достигнет естественных противопожарных рубежей – рек, озер, каменистых безлесных земель и т. п.

Кроме того, значительные площади пожаров при относительно низком количестве возгораний характерны для территорий, покрытых растительностью 1–3-го классов опасности по пирологическим характеристикам (вырубки, гари, редины, сухостойники, лиственничники и ельники с кедровым стлаником и зеленомошными).

Пожары на территории Хабаровского края, наряду с пространственной, характеризуются высокой сезонной неоднородностью (рис. 3). Если в зимний период в среднем наблюдается 4–8 возгораний, то для весны эта величина составляет 650–750 случаев, летом – 170–200, осенью – 160–190. Причем для разных сезонов кроме количественных различий наблюдаются и пространственные сдвиги точек возгораний и областей с их высокой плотностью.

В зимний период пожарная активность практически не наблюдается. Небольшое количество возгораний отмечается на юго-западе края, где воздействию огня подвергаются прежде всего нелесные экосистемы с высокотравными лугами и тростниковыми зарослями вдоль автомобильных дорог, служащих источниками огня при позднем формировании снежного покрова или его раннем сходе.

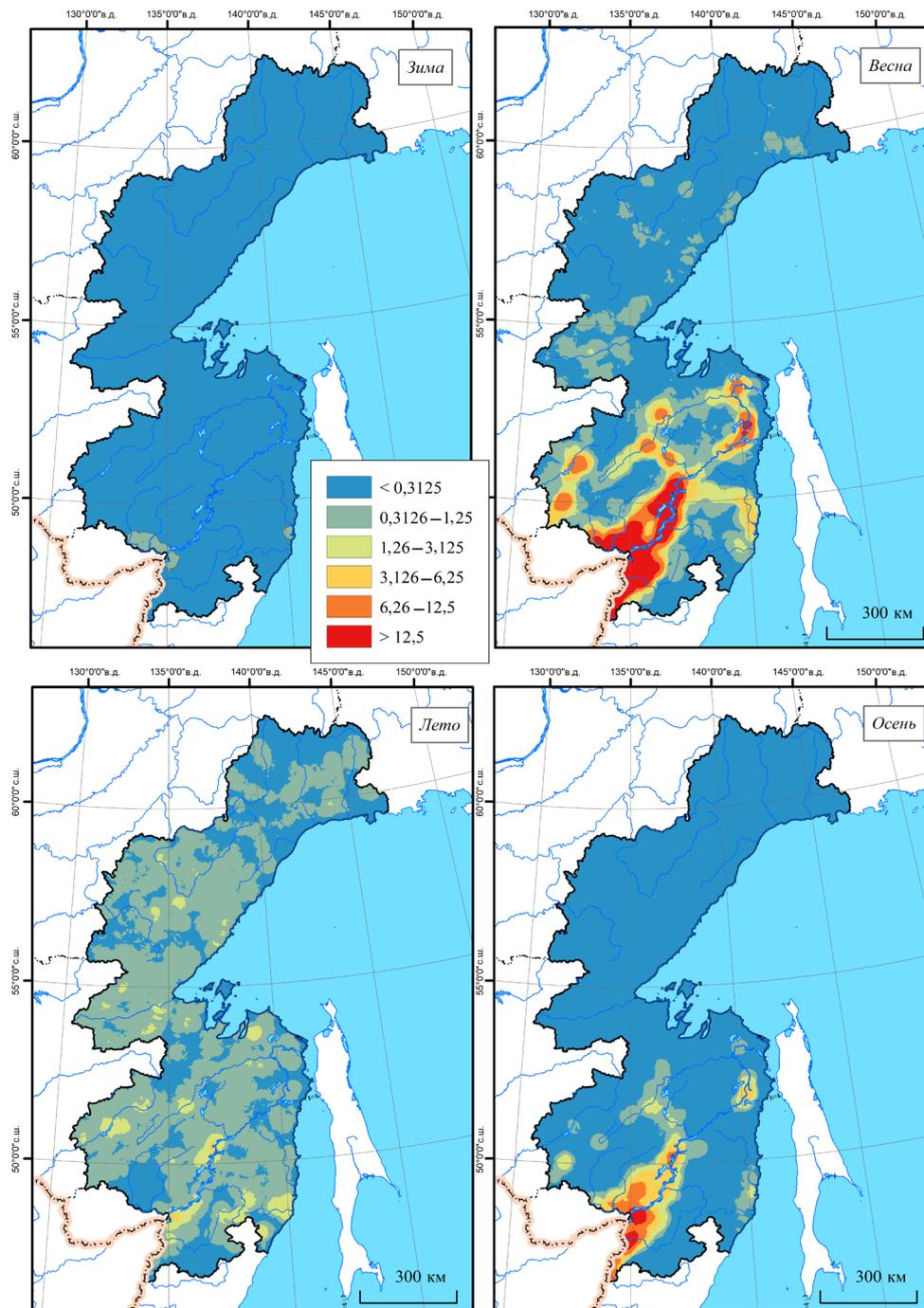


Рис. 3. Карты горимости территории Хабаровского края в различные сезоны по числу пожаров на 250 тыс. га: менее 0,3125 – низкая; 0,3126–1,25 – ниже средней; 1,126–3,125 – средняя; 3,126–6,25 – выше средней; 6,26–12,5 – высокая; более 12,5 – чрезвычайная

Fig. 3. The fire frequency maps of the Khabarovsk Territory area in various seasons by the number of fires per 250 ths ha: less than 0.3125 – low; 0.3126–1.25 – below medium; 1.126–3.125 – medium; 3.126–6.25 – above medium; 6.26–12.5 – high; more than 12.5 – extreme

Весной и осенью бóльшая часть возгораний сосредоточена в пределах долины р. Амур и других крупных рек (р. Горин, р. Амгунь), а также вдоль основных транспортных магистралей (Транссиб, Байкало-Амурская магистраль, железная дорога Хабаровск–Комсомольск-на-Амуре). Как и зимой, в наибольшей степени пирогенному воздействию подвергаются недревесные экосистемы, где основным горючим материалом в этот период является сухая биомасса трав и кустарников.

Летом травяные пожары практически не наблюдаются, основные очаги возгораний смещаются в лесные экосистемы, где есть значительные запасы древесных сухих горючих материалов. Несмотря на все организационные, законодательные и другие меры, основным источником пожаров в южных и центральных районах Хабаровского края остается деятельность человека, что проявляется в приуроченности возгораний к зонам основного лесохозяйственного и горнорудного освоения.

В целом бóльшая часть территории края характеризуется низким уровнем горимости по количеству возгораний на 1 млн га, что связано прежде всего со слабой степенью освоенности территории, снижающей риск возникновения пожара. Так, 88,3 % территории края относится к низкой и ниже средней категориям горимости (табл. 3). Доля таких территорий изменяется по сезонам от 99,99 % в зимний период до 80,1 % в весенний. Одновременно доля территорий с высокой и чрезвычайной горимостью в течение года варьирует от 0 % зимой и летом до 8,7 % весной. Площадная структура земель с различными уровнями горимости по количеству возгораний при расчете по методу скользящего окна сопоставима с результатами расчетов в границах лесничеств, хотя и более пространственно дифференцирована.

Таблица 3

Сезонное и годовое распределение территории Хабаровского края по относительной горимости лесов (по количеству пожаров на 1 млн га)
The seasonal and yearly distribution of the Khabarovsk Territory area by relative forest fire frequency (the number of fires per 1 mln ha)

Относительная горимость	Доля от площади края, % (расчет по методу скользящего окна)					Доля от площади края, % (данные [8])
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	
Низкая	98,8	62,4	30,3	85,9	68,9	62,9
Ниже средней	1,2	18,5	64,3	6,3	19,4	34,9
Средняя	0,001	6,1	5,2	2,8	5,5	1,8
Выше средней	–	4,3	0,2	2,6	3,1	0,3
Высокая	–	3,8	–	1,8	2,5	0,1
Чрезвычайная	–	4,9	–	0,5	0,6	0

Другая ситуация наблюдается при сравнении результатов расчетов фактической горимости по площади пожаров (табл. 4). Если по данным А.М. Орлова и др. [8] доля территорий края с низкой и ниже средней горимостью составляет 57,9 %, то при расчете по методу скользящего окна она увеличивается до 84,8 %, при этом доля земель с высокой и чрезвычайной горимостью снижается

с 33,7 до 7,9 %. Такое значительное уменьшение наблюдается в результате осреднения при расчете в границах лесохозяйственных единиц. Например, территория Хабаровского лесничества Хабаровского края имеет площадь 90,5 тыс. га и по числу пожаров на 1000 га относится к территориям с чрезвычайной горимостью (36,49 га на 1000 га), при этом площади с таким показателем при расчете по методу скользящего окна составляют менее 50 % (рис. 4, *a*). Иное наблюдается в Чумиканском лесничестве (9,4 млн га), относящемся к категории лесничеств с низкой горимостью (0,06 га на 1000 га). Анализ рис. 4, *б* показывает, что в пределах лесничества около 10 % территорий относятся к землям с высокой и чрезвычайной горимостью, а это составляет порядка 94 тыс. га, т. е. сопоставимо с площадями отдельных небольших лесничеств.

Таблица 4

Годовое распределение территории Хабаровского края по относительной горимости лесов (по средней площади пожаров на 1000 га)
The yearly distribution of the Khabarovsk Territory area by relative forest fire frequency (the average fire area per 1000 ha)

Относительная горимость	Доля от площади края, %	
	Расчет по методу скользящего окна	Данные [8]
Низкая	78,4	13,1
Ниже средней	6,4	44,8
Средняя	4,3	4,3
Выше средней	3,0	4,1
Высокая	4,9	5,5
Чрезвычайная	3,0	28,2

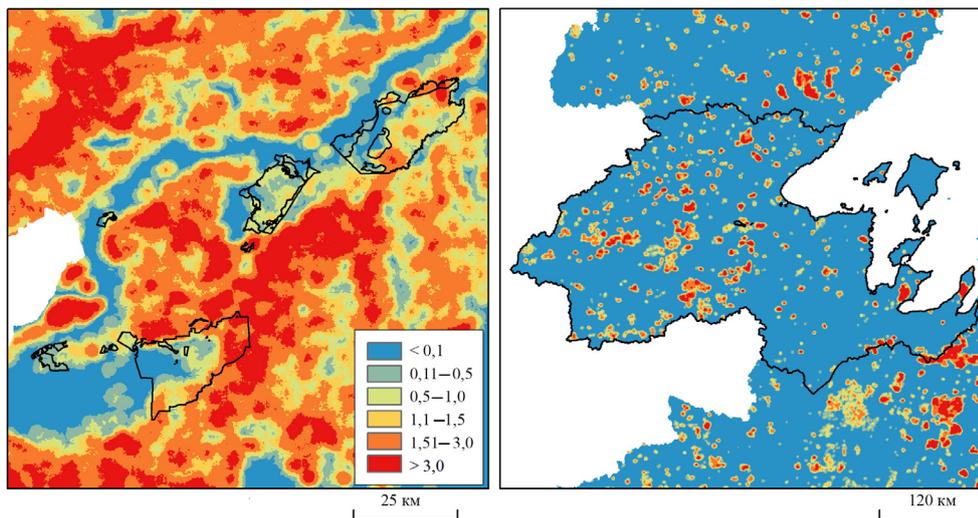
*a**б*

Рис. 4. Карты горимости территорий Хабаровского (*a*) и Чумиканского (*б*) лесничеств Хабаровского края по площади пожаров на 1000 га

Fig. 4. The fire frequency maps of the territories of the Khabarovsk (*a*) and Chumikanskiy (*б*) forestries of the Khabarovsk Territory by the fire area per 1000 ha

Заключение

Разработанные с использованием метода скользящего окна карты горимости ландшафтов Хабаровского края (показывающие число пожаров на 1 млн и 250 тыс. га, а также площади пожаров на 1000 га) позволяют достаточно объективно и детально отразить среднесезонный риск возникновения пожара вне привязки к лесохозяйственным границам как в целом за год, так и по отдельным сезонам. Данные карты в сочетании с картой распределения лесов по классам природной пожарной опасности по пирологическим характеристикам (показывающей риск развития пожара) могут стать основой для оценки фонового пожарного риска, отражающего возможность возникновения и развития пожара независимо от условий погоды. В этом случае суммарный риск лесных пожаров определяется как произведение риска возникновения ландшафтного пожара (за год или по сезонам) и риска развития пожара по пирологическим характеристикам растительности. В сочетании с картами ежедневной степени пожарной опасности по условиям погоды (комплексный показатель пожарной опасности В.Г. Нестерова, показатели влажности надпочвенного покрова и лесной подстилки, предложенные ЛенНИИЛХ) из Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства разработанные нами карты применимы в качестве инструмента оперативного управления противопожарными мероприятиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гусев В.Г. О методе оценки возможности возникновения и распространения пожаров в лесах по их фактической горимости // Тр. СПбНИИЛХ. 2018. № 2. С. 40–52.
Gusev V.G. On the Method for Assessing the Possibility of Occurrence and Spread of Fires in Forests According to Their Actual Burning. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry, 2018, no. 2, pp. 40–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2018.2.40>
2. Залесов С.В., Годовалов Г.А., Платонов Е.Ю. Уточненная шкала распределения участков лесного фонда по классам природной пожарной опасности // Аграр. вестн. Урала. 2013. № 10(116). С. 45–49.
Zalesov S.V., Godovalov G.A., Platonov E.Ju. Clarified Scale for Distribution of Forest Fund Blocks According the Wildfire Hazard Classes. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2013, no. 10(116), pp. 45–49. (In Russ.).
3. Залесов С.В., Миронов М.П. Обнаружение и тушение лесных пожаров. Екатеринбург: УГЛУТУ, 2004. 138 с.
Zalesov S.V., Mironov M.P. *Detecting and Fighting Forest Fires*. Yekaterinburg, USFEI Publ., 2004. 138 p. (In Russ.).
4. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Режим доступа: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 09.02.21).
Remote Monitoring Information System of the Federal Forestry Agency. (In Russ.).
5. Ковалев А.П., Шешуков М.А., Позднякова В.В. Критерии приоритетности тушения лесных пожаров при массовом их возникновении // Лесхоз. информ. 2015. № 3. С. 47–55.

Kovalev A.P., Sheshukov M.A., Pozdnyakova V.V. Decision Algorithm to Prioritize Fighting Forest Fires in Mass They Occur. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2015, no. 3, pp. 47–55. (In Russ.).

6. Марченко В.П., Залесов С.В. Горимость ленточных боров Прииртышья и пути ее минимизации на примере ГУ ГЛПР «Ертыс орманы» // Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та. 2013. № 10(108). С. 55–59.

Marchenko V.P., Zalesov S.V. Fire Occurrence in Belt Pine Forests of the Irtysh River Area (Priirtyshye) and Its Minimization (the Case Study of the State Forest Natural Reserve «Ertys Ormany»). *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2013, no. 10(108), pp. 55–59. (In Russ.).

7. Ольховка И.Э., Залесов С.В. Лесопожарное районирование лесов Курганской области и рекомендации по их противопожарному обустройству // Современ. проблемы науки и образования. 2013. № 5. Ст. № 687. Режим доступа: <https://s.science-education.ru/pdf/2013/5/296.pdf> (дата обращения: 02.08.19).

Olhovka I.E., Zalesov S.V. Forest Fire Zoning in Forests of Kurgan Region and Some Recommendations on Their Antifire Arrangement. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education, 2013, no. 5, art. no. 686. (In Russ.).

8. Орлов А.М., Андреев Ю.А., Чаков В.В., Позднякова В.В. Пожарная обстановка в лесах Хабаровского края. Хабаровск: Хабаров. краев. тип., 2022. 160 с.

Orlov A.M., Andreev Yu.A., Chakov V.V., Pozdnyakova V.V. *The Fire Situation in the Forests of the Khabarovsk Territory*. Khabarovsk, Khabarovsk Regional Print. House, 2022. 160 p. (In Russ.).

9. Рубцов А.В., Сухинин А.И., Ваганов Е.А. Классификация территории Сибири по фактической горимости с использованием спутниковых данных // Журн. СФУ. Сер.: Биология. 2010. Т. 3, № 1. С. 30–39.

Rubtsov A.V., Sukhinin A.I., Vaganov E.A. Actual Fire Danger Classification of the Siberian Territories Using Satellite Data. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya* = Journal of Siberian Federal University. Biology, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 30–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0215>

10. Шубин Д.А., Залесов С.В. Последствия лесных пожаров в сосняках Приобского водоохранного сосново-березового лесохозяйственного района Алтайского края: моногр. Екатеринбург, 2016. 127 с.

Shubin D.A., Zalesov S.V. *Consequences of Forest Fires in the Pine Forests of the Priobsky Water Protection Pine-Birch Forestry Area of the Altai Territory*: Monograph. Yekaterinburg, 2016. 127 p. (In Russ.).

11. Шубин Д.А., Залесова Е.С., Толстиков А.Ю. Показатели фактической горимости ленточных боров Алтайского края // Успехи современ. естествознания. 2019. № 10. С. 23–28.

Shubin D.A., Zalesova E.S., Tolstikov A.Yu. Actual Burning Index (Fire Coad Index) of Stripe Pine Forest in Altai Region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2019, no. 10, pp. 23–28. (In Russ.).

12. Шубин Д.А., Малиновских А.А., Залесов С.В. Влияние пожаров на компоненты лесного биогеоценоза в Верхне-Обском боровом массиве // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2013. № 6(44). С. 205–208.

Shubin D.A., Malinovskikh A.A., Zalesov S.V. The Effect of Fires on the Components of Forest Biogeocenosis in the Upper Ob Hog Mass. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Orenburg State Agrarian University, 2013, no. 6(44), pp. 205–208. (In Russ.).

13. Efremov D.F., Sheshukov M.A. Ecological and Economic Evaluation of the Consequences of Catastrophic Fires in the Russian Far East: The Khabarovsk Territory Example of 1998. *International Forest Fire News*, 2000, no. 22, pp. 53–62.

14. *FIRMS: Fire Information for Resource Management System*. Available at: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/> (accessed: 19.02.22).

15. Goldammer J.G., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Ponomarev E. Current Fire Regimes, Impacts and the Likely Changes – II: Forest Fires in Russia – Past and Current Trends. *Vegetation Fires and Global Change. Challenges for Concerted International Action: A White Paper Directed to the United Nations and International Organizations*. Germany, Eifelweg, Global Fire Monitoring Center (GFMC) / Kessel Publ. House, 2013, pp. 51–79.

16. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csiszar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G., Loboda T. Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia at Federal and Regional Levels. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, pp. 113–145. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-1013-7>

17. Shvidenko A.Z., Nilsson S. Extent, Distribution, and Ecological Role of Fire in Russian Forests. *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Ecological Studies*, vol. 138. New York, Springer, 2000, pp. 132–150. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21629-4_8

18. Soja A.J., Sukhinin A.I., Cahoon Jr D.R., Shugart H.H., Stackhouse Jr P.W. AVHRR-Derived Fire Frequency, Distribution, and Area Burned in Siberia. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 25, iss. 10, pp. 1939–1960. <https://doi.org/10.1080/01431160310001609725>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

 ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ
ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья

УДК 630*235:004.94

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-119-133

Имитационная модель дисковой лесопосадочной машины

Л.Д. Бухтояров[✉], канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAO-5129-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-0821),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

С.В. Малюков, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [N-2656-2016](https://orcid.org/0000-0003-2098-154X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>

М.Н. Лысыч, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [N-3089-2016](https://orcid.org/0000-0002-3764-3873),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

М.А. Гнусов, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [AAT-9060-2020](https://orcid.org/0000-0003-1653-4595),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; vglta-mlx@yandex.ru[✉], malyukovsergey@yandex.ru, miklynea@yandex.ru, mgnusov@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.12.23 / Одобрена после рецензирования 03.03.24 / Принята к печати 06.03.24

Аннотация. Для проведения искусственного лесовосстановления необходимо использовать механизированные средства – лесопосадочные машины. Отсутствие отечественных лесопосадочных машин является одной из проблем искусственного лесовосстановления в России. Цель исследования – обоснование конструктивных параметров лесопосадочной машины с дисковым рабочим органом. Для достижения поставленной цели требуется применение современных программных сред с возможностью полного учета всех воздействующих на машину факторов. В ходе данного исследования средствами системы автоматизированного проектирования разработана твердотельная модель лесопосадочной машины. В качестве расчетной среды для изучения параметров модели выбран программный комплекс «Универсальный механизм 9.1», предназначенный для моделирования динамики и кинематики механических систем. В комплекс вводились только входные величины для имитационной модели, т. к. математический аппарат заложен в ядро программы. С помощью программного комплекса создана имитационная модель лесопосадочной машины, учитывающая как взаимодействие звеньев машины, так и дискретное контактное взаимодействие саженца с машиной и почвой. Проведен вычислительный эксперимент и установлены кинематические и динамические параметры лесопосадочной машины, при которых подающий аппарат не будет препятствовать свободному выпадению брикета с саженцем. Определены геометрические параметры механизма, согласующие профиль кулачка с его движением вместе с диском и работой роликового толкателя так, чтобы захваты своевременно устанавливали брикет с саженцем в почву. Найдена траектория движения брикета с саженцем. С помощью FDM 3D-печати изготовлен полноразмерный макет дискового посадочного аппарата, проведен лабораторный эксперимент для

установления требуемого крутящего момента на ступице посадочного диска и вала барабана. Результаты эксперимента подтвердили адекватность разработанной имитационной модели.

Ключевые слова: лесопосадочные машины, кинематика, динамика, имитационное моделирование, Универсальный механизм (УМ), система автоматизированного проектирования

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>.

Для цитирования: Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н., Гнусов М.А. Имитационная модель дисковой лесопосадочной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 119–133. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-119-133>

Original article

The Simulation Model of a Disk Tree-Planting Machine

Leonid D. Bukhtoyarov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAO-5129-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-0821), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

Sergey V. Malyukov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-2656-2016](https://orcid.org/0000-0003-2098-154X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>

Mikhail N. Lysych, Candidate of Engineering; ResearcherID: [N-3089-2016](https://orcid.org/0000-0002-3764-3873),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

Maksim A. Gnusov, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAT-9060-2020](https://orcid.org/0000-0003-1653-4595),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; vgta-mlx@yandex.ru[✉], malyukovsergey@yandex.ru, miklynea@yandex.ru, mgnusov@yandex.ru

Received on December 8, 2023 / Approved after reviewing on March 3, 2024 / Accepted on March 6, 2024

Abstract. To carry out artificial reforestation, it is necessary to use mechanized means – tree-planting machines. The lack of domestic tree-planting machines is one of the problems of artificial reforestation in Russia. The purpose of the study is to substantiate the design parameters of a tree-planting machine with a disk operating device. To achieve this goal, the use of modern software environments is required with the possibility of full consideration of all factors affecting the machine. In the course of this research, a solid model of a tree-planting machine has been developed by means of a computer-aided design system. The “Universal Mechanism 9.1” software package, designed for modeling the dynamics and kinematics of mechanical systems, has been chosen as a computational environment studying the parameters of the model. Only the input values for the simulation model have been introduced into the software package, since the mathematical apparatus is embedded in the core of the program. Using the software package, a simulation model of a tree-planting machine has been created, taking into account both the interaction of the machine links and the discrete contact interaction of the seedling with the machine and the soil. A computational experiment has been carried out and the kinematic and dynamic parameters of the tree-planting machine have been established, in which the feeder would not interfere with the free fallout of the briquette with the seedling. The geometric parameters of the mechanism have been determined to match the cam profile with its movement along with the disk and the operation of the roller



tappet so that the grippers install the briquette with the seedling into the soil in a timely manner. The trajectory of movement of the briquette with the seedling has been found. With the help of FDM 3D-printing, a full-size model of a disk planting apparatus has been made, and a laboratory experiment has been conducted to establish the required torque on the hub of the planting apparatus disk and the shaft of the drum. The results of the experiment have confirmed the adequacy of the developed simulation model.

Keywords: tree-planting machines, kinematics, dynamics, simulation modeling, Universal Mechanism (UM), computer-aided design system

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>.

For citation: Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysych M.N., Gnusov M.A. The Simulation Model of a Disk Tree-Planting Machine. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 119–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-119-133>

Введение

Значительные темпы сокращения лесных площадей обуславливают необходимость проводить искусственное лесовосстановление. Ручная посадка лесных культур характеризуется низкой производительностью, поэтому требуется использовать механизированные лесопосадочные машины, разработка которых малоэффективна без обоснования их кинематических и динамических параметров [19, 20].

Лесопосадочная машина должна быть предназначена для посадки семян и саженцев хвойных и лиственных пород с открытой и закрытой корневой системой. В исследовании О.И. Григорьевой с соавт. [3] отмечено, что отсутствие отечественных лесопосадочных машин для работы с посадочным материалом с закрытой корневой системой является одной из проблем искусственного лесовосстановления в стране. Положительное влияние на экологию лесных экосистем выборочных рубок и последующего лесовосстановления отмечено в работе Т. Kuuluvainen [18]. Цель данной работы – предложить конструкцию и имитационную модель оборудованной дисковым посадочным аппаратом лесопосадочной машины для саженцев и семян с закрытой корневой системой (в брикете) при обеспечении высокого качества посадки. Для достижения цели необходимо использовать современные методы моделирования, описывающие взаимодействия звеньев машины как друг с другом, так и с объектом посадки – саженцем и местом посадки – грунтом.

Вопросам взаимодействия рабочих органов машин с гранулированной почвенной средой посвящена работа V. Vivainis et al. [9]. Взаимодействие дискового рабочего органа с сыпучей средой методом DEM изучено в работе Z. Guan et al. [16]. Модель для имитации динамики взаимодействия саженца с грунтом с учетом влияния условий среды выращивания рассмотрена в статье H. Gong et al. [15]. Модель для лезвия, на котором происходят трение и удар, представлена в работе X. Guo et al. Сила удара моделируется с использованием модели линейной пружины, а сила трения – моделью тангенциальной пружины в состоянии прилипания и моделью кулоновского трения в состоянии скольжения [17]. Исследованиям кинематики вращающихся звеньев с помощью виртуального прототипирования посвящена работа Y. Chen et al. [14]. В ней посредством модуля Motion SolidWorks получены траектории движения фрезерной головки, определен диапазон ее вращения. В работе H. Ma et al. изучена

модель ротора с лопастями, учитывающая боковые и крутильные деформации вала [19]. Вал и жесткий диск описываются множественными точками сосредоточенной массы, связанными безмассовыми пружинами. Имитационную модель взаимодействия колеса транспортного средства с почвой с помощью программы «Универсальный механизм 9.1» разработал и исследовал Е.Е. Клубничкин [6]. Методами компьютерного моделирования В.И. Посметьев с соавт. установил оптимальные параметры коникового устройства лесовоза [7]. В.Е. Клубничкиным с соавт. предложена 3D-модель погрузочно-транспортной машины, на основании этой модели с использованием программных продуктов создана динамическая модель рулевого управления [5]. И.М. Бартеневым и др. [1, 4, 8] рассмотрены современные системы машин, технологии лесовосстановления и методы их расчета.

В наших исследованиях ранее использовались среды Matlab Simulink, Solidworks Motion, Unity, SimInTech [2, 10–13], позволяющие быстро разработать 3D-модель и провести вычислительный эксперимент, однако учет дискретного контактного взаимодействия с объектом посадки и грунтом вызывает сложности, обуславливая необходимость применения пакетов динамического моделирования.

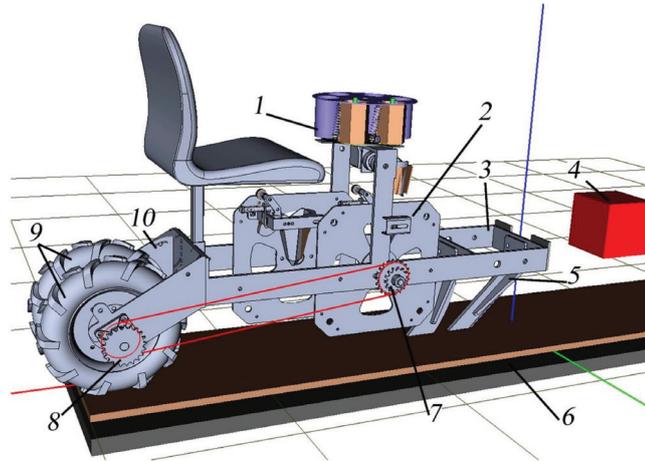
Объекты и методы исследования

Объектом исследования является дисковая лесопосадочная машина. Для получения имитационной модели такой машины используем следующий подход. На 1-м этапе с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) разработаем твердотельную модель лесопосадочной машины, состоящую из звеньев, объединенных кинематическими парами в сборку. На 2-м этапе перепроектируем сборку, исключив лишние степени свободы и объединяя звенья в укрупненные узлы. На 3-м этапе проведем экспорт звеньев, представленных в виде полигональных твердых тел, в программный комплекс для моделирования динамики и кинематики механических систем «Универсальный механизм 9.1». Данные о месте расположения и типах кинематических пар в сборке лесопосадочной машины из САПР введем в имитационную модель «Универсальный механизм 9.1». На 4-м этапе с помощью средств программного комплекса добавим в имитационную модель фактор контактных взаимодействий звеньев, параметры пружин, цепных передач и проведем вычислительный эксперимент.

При разработке имитационной модели в «Универсальном механизме 9.1» выполним следующие действия. Представим трактор как сосредоточенную массу в виде параллелепипеда с размером сторон 0,2 м, весом 3200 кг, расположенную на высоте 0,315 м и на расстоянии –0,4 м от базовой системы координат. Зададим ему возможность поступательно перемещаться по оси OX , со скоростью подачи V_{pod} . Лесопосадочная машина крепится пластинами рамы к навеске трактора. Они установлены жестко, но по оси OX зададим фиктивную силу трения, равную $14 \cdot 10^{10}$ Н. Измерение силы трения в сочленении навески и рамы позволит оценить затраты тягового усилия трактора на движение. Все импортируемые из САПР звенья не требуют смещения относительно друг друга, т. к. в параметрах полигонов, с помощью которых они представлены, уже учтено их взаимное расположение. Общая компоновочно-кинематическая схема лесопосадочной машины показана на рис. 1 (1 – посадочный барабан; 2 – дисковый рабочий орган).

Рис. 1. Компонувочно-кинематическая схема лесопосадочной машины

Fig. 1. The layout-kinematic diagram of a tree-planting machine



Рама лесопосадочной машины движется вместе с трактором 4 поступательно относительно неподвижной земли 6. Присоединим неподвижно к раме 3 нож 5 и фланец колес 10. Вставим вал 8 с неподвижно установленными на нем колесами 9 в подшипниковые узлы. Вал имеет одну вращательную степень свободы относительно подшипниковых узлов фланца колес.

Колеса опираются на верхний слой почвы, представленный в виде параллелепипеда со сторонами $5,00 \times 0,50 \times 0,02$ м. Между колесами и почвой действует сила трения качения и скольжения. Параметры скольжения: коэффициент трения $f = 0,25$; коэффициент трения $f_0 = 0,3$; скорость – 0 м/с; коэффициент кривой – 1; коэффициент трения – 0. Параметры нормального контакта: коэффициент жесткости – $1 \cdot 10^6$; коэффициент демпфирования – $1 \cdot 10^4$. Параметры качения: коэффициент трения качения – 0 м; коэффициент трения верчения – 0 м (имеют размерность длины). Геометрия контакта «почва–колеса»: координаты X, Y, Z для центра окружности колеса равны 1,40853; 0 и 0,200803 м соответственно; радиус колеса – 0,205 м; нормаль – (0; 1; 0); точка на плоскости имеет координаты X, Y, Z – 0; 0 и –0,001 м соответственно; внешняя нормаль точки – (0; 0; 1).

От действия сил трения на опорных колесах возникает крутящий момент, который передается валу и далее через звездочку цепной передачи на промежуточную звездочку ступицы вращения дисков 8. Для скорости подачи 0,5 м/с скорость вращения ступицы дисков составит 2,22 рад/с. Параметры цепной передачи: координаты оси ведущей звездочки – 1,40854; 0,2 и 0,2008 м соответственно; координаты оси ведомой (промежуточной) звездочки – 0,6; 0,2 и 0,3 м соответственно; направление оси вращения ведущей звездочки – (0; 1; 0); ведомой – (0; 1; 0); радиусы ведущей и ведомой звездочек – по 0,05 м каждый; коэффициент жесткости цепной передачи – $5 \cdot 10^7$; коэффициент диссипации цепной передачи – $1 \cdot 10^6$.

На рис. 2 представлена компоновочно-кинематическая схема рабочего органа лесопосадочной машины, шаг масштабной сетки – 0,05 м. Изображено по 2 комплекта натяжителя, пружин, пары захватов (в реальности их будет установлено 4, такое допущение было сделано для ускорения процесса моделирования).

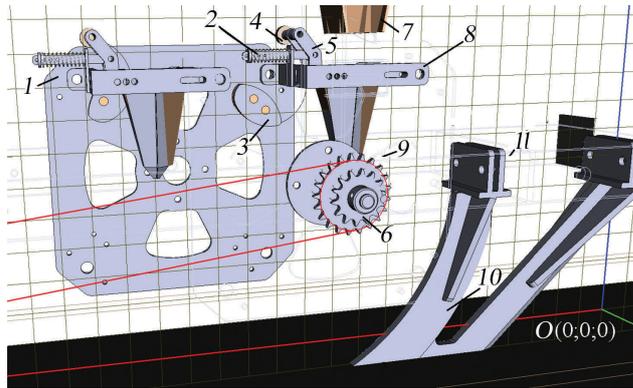


Рис. 2. Компоночно-кинематическая схема рабочего органа лесопосадочной машины
Fig. 2. The layout-kinematic diagram of an operating device of a tree-planting machine

Промежуточная звездочка 6 соединена вращательным шарниром с рамой 11. На ступице жестко закреплен ведущий диск 9 (представлен в проволочном виде, чтобы не затенять остальные звенья). Между ведущим 9 и ведомым 1 дисками шарнирно установлен посадочный конус, разделенный на 2 захвата – правый 8 и левый 5. В проушине правого захвата шарнирно закреплен левый захват, на его конце есть ролик 4. Левый захват подпружинен натяжителем 2, который правым концом шарнирно установлен на левом захвате. Снаружи натяжителя расположена пружина, одним концом она опирается на пластину правого захвата, а другим – на выступ натяжителя. Параметры пружины следующие: наружный диаметр – 12 мм; диаметр проволоки – 1 мм; жесткость – 500 Н/м; свободная длина – 80 мм; рабочий ход L_1-L_2 – 64–38 мм; усилие предварительного натяжения – 8,08 Н/м; максимальная рабочая нагрузка – 21,21 Н. Ролик 4 при вращении диска в нижнем положении захватов воздействует на кулачок 3, и происходит раскрытие захвата 5 относительно захвата 8, в результате чего саженец помещается в борозду. Для того чтобы он гарантированно попадал в захваты, установлена корзина успокоителя 7. Между роликом 4 и кулачком 3 зададим типовое взаимодействие – кулачковый механизм. На рис. 2 цифрой 10 обозначен черенковый нож.

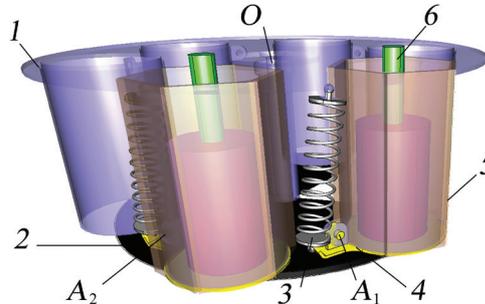
Параметры кулачкового механизма: начало системы координат кулачка – 0; 0; 0 м соответственно для X , Y и Z ; начало системы координат (оси вращения) ролика – 0,618; –0,0482 и 0,52347 м; контакт идет по профилю графического образа кулачка; тип контакта – роликовый; коэффициент трения кулачка $f = 0,25$; $f_0 = 0,3$; коэффициент жесткости кулачка – $1 \cdot 10^7$; коэффициент демпфирования кулачка – 1000; радиус ролика – 0,015 м. Графическое представление кулачка получено на основании начального положения объекта в 3D-модели лесопосадочного механизма как сглаженный кубическими сплайнами контур, построенный по последовательно соединенным координатам (м): (0,707; 0,432); (0,704; 0,438); (0,701; 0,441); (0,697; 0,444); (0,690; 0,444); (0,677; 0,442); (0,666; 0,437); (0,651; 0,426); (0,639; 0,411); (0,631; 0,394); (0,628; 0,383); (0,630; 0,377); (0,640; 0,347); (0,652; 0,374); (0,664; 0,377); (0,675; 0,381); (0,685; 0,387); (0,695; 0,395); (0,702; 0,405); (0,707; 0,413); (0,708; 0,424); (0,707; 0,432). Система координат кулачка повернута на -90° относительно оси OZ и смещена на 0,055 м по оси OX .

Для учета воздействия почвы при внедрении захватов к их нижним точкам были приложены вертикальные и горизонтальные составляющие сил как функции времени.

Посадочный барабан (рис. 3) выполним в отдельной подсистеме, в которую из общей модели будем передавать скорость вращения и начальную точку крепления на раме.

Рис. 3. Компонентно-кинематическая схема подачи саженцев

Fig. 3. The layout-kinematic scheme for seedling feeding



Скорость подачи лесопосадочной машины примем 1,8 км/ч (0,5 м/с). От опорных колес, расположенных на задней части рамы, вращение к ступице дисков передается через цепную передачу. Расчет проведем для передаточного отношения цепной передачи, равного 1. Угловую скорость опорных колес рассчитаем по формуле $k = V_{pod}/R_k = 0,5/0,225 = 2,22$ рад/с (R_k – радиус опорного колеса). Для принятого передаточного отношения цепной передачи угловая скорость ступиц дисков составит также 2,22 рад/с. На дисках размещено 4 посадочных конуса. Барабан подачи имеет 6 стаканов для установки саженцев. Таким образом, угловая скорость вращения вала барабана w_b должна быть в 1,5 раза меньше скорости ступицы дисков, т.е. 1,48 рад/с.

Саженцы в брикетах b устанавливаются вручную оператором в подающие стаканы барабана 5 . Снизу стаканы закрываются крышками 4 , расположенными на шарнирах A_1 – A_6 и опирающимися на размыкатель 2 . Между проушиной у вершины стакана и проушиной крышки находится пружина сжатия 3 . Барабан 1 вращается на валу (кинематическая пара O) относительно размыкателя 2 , имеющего вырез в виде сектора, в который подается саженец. Параметры вращательной кинематической пары «размыкатель–барабан»: пластина размыкателя находится в начале системы координат подсистемы $(0; 0; 0)$ и жестко в ней закреплена. К размыкателю с помощью вращательного относительно оси OZ шарнира прикреплен барабан и поднят на 0,001 м по оси OZ , чтобы обеспечить зазор между крышкой и размыкателем. Поворот размыкателя и барабана осуществляется относительно оси OZ $(0; 0; 1)$. Угол поворота $j_b(t), \dots^\circ$, в кинематической паре задан как функция времени через угловую скорость: $j_b(t) = w_b t$, где $w_b = 1,48$ рад/с. Начальный угол поворота барабана относительно размыкателя настраивается для согласования фаз движения захватов диска с гильзами барабана: $j_{0b} = 50^\circ$. К проушине стакана барабана через вращательный шарнир прикреплена проушина крышки. Предварительно на основании геометрии механизма были определены координаты шарнирных точек крепления. Для нахождения составляющих вектора шарнира в САПР измерен угол между плоскостью проушины и плоскостью XOZ , после чего получены проекции на оси OX, OY . Параметры вращательной кинематической пары «стакан–крышка»: координаты шарнирной точки проушины стакана $X, Y, Z - 0,10125; 0,04494; 0,01199$ м соответственно; крышки – $-0,04717; 0; 0,01100$ м; шарнирный вектор проушины стакана $(-0,9563; 0,2923; 0)$; шарнирный век-

тор проушины крышки (0;1;0). В шарнир были добавлены момент от сил трения (крышки) – 0,01 Н·м, коэффициенты жесткости $1 \cdot 10^6$ и диссипации $1 \cdot 10^4$ для крышки, отношение начального коэффициента трения к коэффициенту трения – 1,2.

Для регулирования скорости открытия крышки так, чтобы она не препятствовала свободному падению брикета, необходимо установить между стаканом и крышкой пружину со следующими параметрами: наружный диаметр – 8 мм; диаметр проволоки – 0,8 мм; жесткость пружины – 180 Н/м; свободная длина – 70 мм; рабочий ход пружины L_1-L_2 – 105–80 мм; усилие предварительного натяжения – 0,8 Н/м; рабочая максимальная нагрузка – 6,14 Н. Точки крепления найдены на основании геометрии стакана с использованием САПР. Аналогично создадим вторую пружину для еще одной крышки и еще одного стакана.

Саженец с закрытой корневой системой после установки оператором в барабан начинает взаимодействовать с его стенками и с крышкой. Для работы 3D-контакта необходимо задание выпуклого полиэдра. С этой целью мы спроектировали стакан 5 (см. рис. 3) как отдельный объект, состоящий из 6 одинаковых параллелепипедов размером $0,1200 \times 0,4215 \times 0,0045$ м, внутрь которых вписана окружность каждого из стаканов барабана, выполненных в виде 3D-модели. Контактная поверхность крышки представлена конусом (частный случай – цилиндр) высотой 0,002 м, верхний и нижний радиусы – по 0,039 м. Размыкатель имеет форму конуса высотой 0,005 м, верхний и нижний радиусы – по 0,13 м, разомкнут на 75° . Таким образом, саженец посредством встроенного в «Универсальный механизм 9.1» контактного взаимодействия будет осуществлять свое перемещение с учетом контакта с гранями указанных объектов.

Создав шарнир с 6 степенями свободы между барабаном и стаканом из параллелепипедов и отключив все степени, получим его жесткую заделку относительно барабана. Для того чтобы стакан (в виде объекта из 6 параллелепипедов) расположить на осях стаканов 3D-барабана, выполним смещение по оси OX на 0,115 м. С целью исключения контакта стакана с размыкателем поднимем его на 0,002 м по оси OZ . Второй стакан смещен относительно первого на 60° , поэтому выполним поворот вокруг оси OZ на данную величину.

Саженец с закрытой корневой системой состоит из брикета с почвой и ствола. Оба объекта представим в виде конусов: ствол – высотой 0,05 м, с верхним и нижним радиусами 0,007 м; брикет – высотой 0,08 м, с верхним и нижним радиусами 0,025 м. Между брикетом и стволом зададим шарнир с 6 степенями свободы и, отключив все степени, получим жесткую заделку ствола относительно брикета. Расположим ствол на высоте 0,08 м относительно брикета. Аналогично создадим шарнир для второго брикета со стволом.

Расположим саженец в барабане, для этого создадим шарнир с 6 степенями свободы между крышкой и брикетом, поднимем брикет относительно крышки на 0,002 м, чтобы в начальный момент времени саженец не взаимодействовал и не срабатывал 3D-контакт.

Аналогично создадим шарнир между второй крышкой и брикетом. Так как ранее нами уже были заданы заделка ствола относительно брикета и вращение крышки относительно барабана, программа сама расположит в соответствии с описанными шарнирами саженец внутри стакана барабана. Таким образом, брикет не связан через степени свободы с другими телами (все степени свободны), а взаимодействует с ними только через 3D-контакт.

Выполним моделирование процесса работы лесопосадочной машины. Расчетные параметры имитационного моделирования: численный метод решения – Park; тип решения – метод ядра NSM; время моделирования – 10 с; шаг представления результатов $2 \cdot 10^{-4}$ с; погрешность $1 \cdot 10^{-6}$; включены замедление моделирования до реального масштаба времени и расчет матриц Якоби. Параметры 3D-контакта: парциальная частота 3D-контакта – 100 Гц; доля демпфирования – 0,3; коэффициент трения покоя – 0,3; коэффициент трения скольжения – 0,25; расстояние между точками – 0,05 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты имитационного моделирования подсистемы подачи. Расположим виртуальный датчик перемещения координат X , Y , Z на крышке в точке (0,039; 0; 0) и на брикете в точке (0; 0; 0). Точка на крышке является наиболее удаленной от шарнира крайней точкой, которая последней взаимодействует с размыкателем, точка на брикете является нижней опорной точкой брикета.

Построим траектории движения выбранных точек на брикете и крышке. На рис. 4, а показан участок, на котором происходит открытие крышки и подача брикета, на рис. 4, б представлена вся траектория точек брикета и крышки в плоскости XOZ .

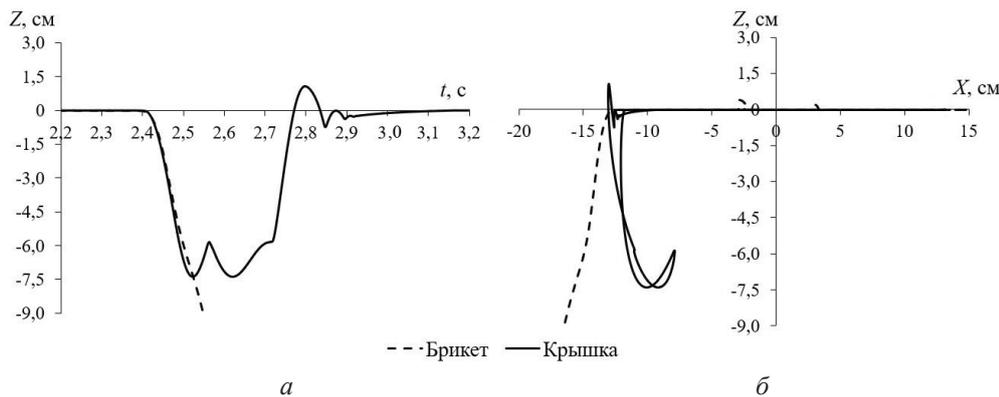


Рис. 4. Траектории движения точек крышки и брикета: а – открытие и подача брикета (фрагмент); б – полный оборот барабана

Fig. 4. The trajectories of movement of the lid and briquette points: а – opening and briquette feeding (fragment); б – full revolution of the drum

Мы видим, что вслед за открытием крышки (уменьшение ее вертикальной координаты) идет падение брикета, причем брикет не касается крышки (траектории не пересекаются).

Так как крышка вращается вокруг шарнира стакана, происходит ее закрытие в ноль при возвращении на размыкатель, в то время как брикет продолжает падение вниз. Кроме характерных движений открытия и закрытия крышки есть несколько штрихов выше нуля по оси OZ для крышки. Они свидетельствуют о том, что в начальный момент времени брикет находился на расстоянии 0,002 м над крышкой. Таким образом, под действием контактных сил со стороны стакана и крышки саженец был доведен до места сброса, после чего крышка резко открылась и не мешала свободному падению брикета вниз.

Между проушинами стакана и крышки установлена пружина, добавим к ней виртуальный датчик и получим силу сжатия. При закрытом движении крышки сила сжатия пружины составляет 0,8 Н, а при открытии падает до 0,2 Н. В шарнире между проушинами стакана и крышки действует момент сил трения, а также момент силы от пружины и момент силы реакции 3D-контакта крышки с размыкателем. После фильтрации показаний виртуального датчика до частоты 10 Гц выявим, что максимальное значение момента в шарнире составит 18 Н·м.

Результаты имитационного моделирования процесса работы лесопосадочной машины в целом, с учетом работы подсистемы подачи. Процессы открытия крышки, сбрасывания брикета с саженцем, попадания его в успокоитель и далее в захваты, а после опускания в направлении почвы показаны на рис. 5, а; рис. 5, б иллюстрирует раскрытие захватов, установку брикета с саженцем в почву и начало закрытия захватов.

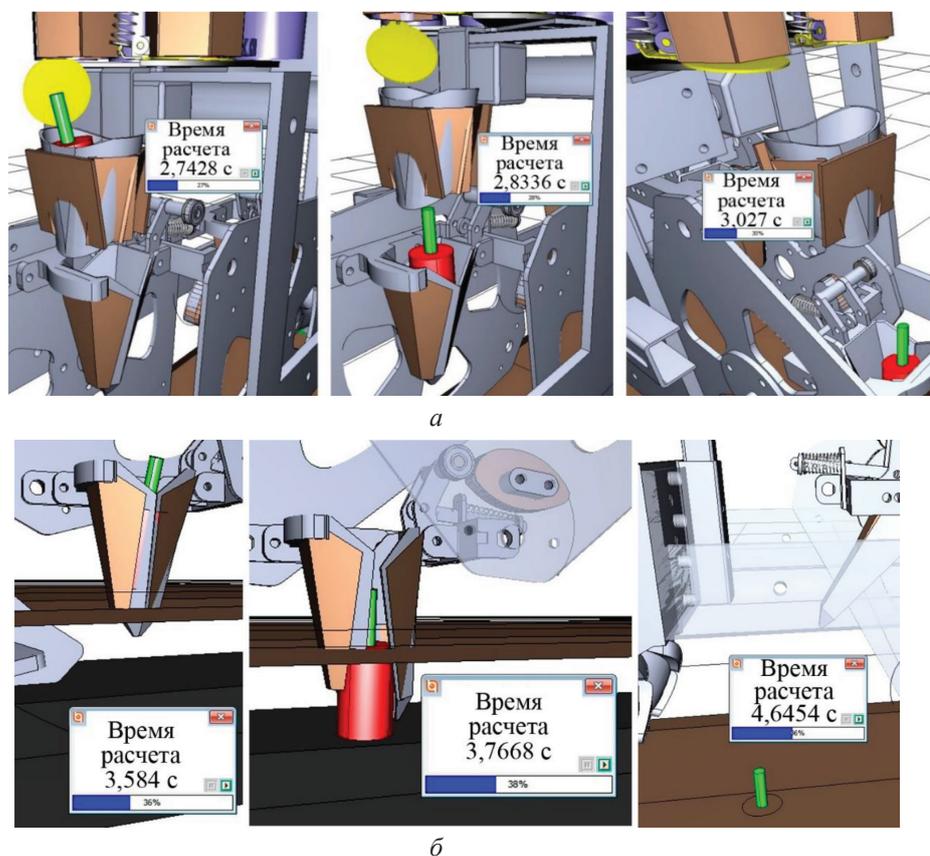


Рис. 5. Результаты моделирования процесса работы лесопосадочной машины: а – подача саженца из барабана в захваты; б – установка брикета с саженцем в почву

Fig. 5. The results of modeling the process of operation of a tree-planting machine: а – feeding the seedling from the drum into the grippers; б – installing a briquette with a seedling into the soil

Как видно из модели, кулачок настроен таким образом, чтобы левый захват не задевал ствол при подъеме, правый захват при этом обладает нулевой скоростью по оси OX относительно саженца в момент его установки в почву.

Нагрузки от внедрения захватов в почву передаются на контактное взаимодействие «ролик–кулачок». Важным условием для соблюдения требования по шагу посадки является отсутствие проскальзывания опорных колес, от которых осуществляется привод на диски с захватами.

Для апробации результатов компьютерного моделирования детали посадочного аппарата были изготовлены из АБС-пластика методом FDM 3D-печати, в местах крепления использованы стандартные металлические винты и пружины, подшипники, а диски и корпус вырезаны лазером из акрилового стекла (рис. 6).



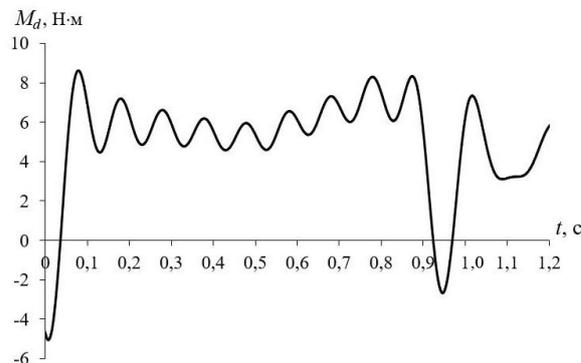
Рис. 6. Макет лесопосадочной машины: *а* – дисковый рабочий орган; *б* – подсистема подачи саженцев

Fig. 6. The model of a tree-planting machine: *a* – disk operating device; *b* – subsystem for seedling feeding

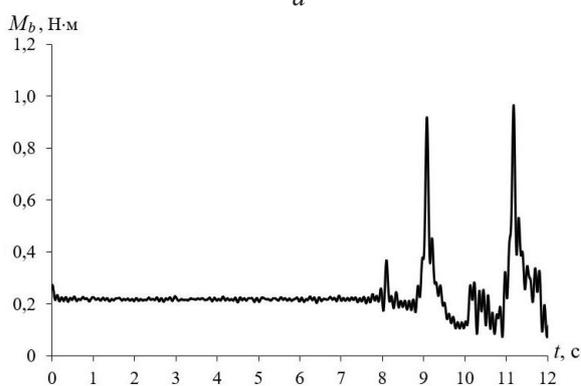
Чтобы исключить влияние всех узлов на показания крутящего момента посадочного аппарата, имитационная модель была упрощена и приведена в соответствие с макетом. Были выключены цепная передача от приводных колес, поступательное движение трактора, силы от воздействия почвы на посадочные конусы. Зарядный барабан представлен отдельной подсистемой без учета конического привода.

Полученные в результате вычислительного эксперимента значения крутящего момента на ступице диска и на валу посадочного барабана показаны на рис. 7. На рис. 7, *а* видно, что момент на ступице достигает значения 8 Н·м, падение момента связано с холостым вращением диска под действием сил тяжести без сопротивления в паре «кулачок–ролик». На рис. 7, *б* отчетливо проявляются 2 всплеска, соответствующие открытию и закрытию 2 крышек. В эксперименте были задействованы 2 крышки стаканов, в то время как всего их – 6, поэтому необходимо умножить момент на 3 – получаем 2,7 Н·м.

Экспериментальные исследования. На шкив намотаем шнур и подвесим груз. За счет постепенного увеличения массы груза определим момент, необходимый для свободного поворота посадочного аппарата. Аналогичным образом исследуем крутящий момент на валу зарядного барабана. В результате эксперимента было установлено, что крутящий момент, требуемый для свободного поворота посадочного аппарата, составляет 6,12 Н·м, а для зарядного устройства – 3,42 Н·м.



a



б

Рис. 7. Крутящий момент: *a* – на ступице диска посадочного аппарата; *б* – на валу посадочного барабана

Fig. 7. The torque: *a* – on the hub of the planting apparatus disk; *b* – on the shaft of the planting drum

Для ступицы диска посадочного аппарата по данным имитационного моделирования момент составил 8 Н·м, а по результатам экспериментальной проверки незначительно меньше – 6,12 Н·м. Разница оказалась не более 24 %. Данное различие может объясняться тем, что в лабораторном эксперименте устанавливались все 4 посадочных конуса с пружинами. Поэтому к моменту схода ролика с кулачка текущего конуса предшествующий ему конус уже начал свое раскрытие, что повышало общий момент сопротивления.

Для зарядного устройства по данным моделирования момент составил 2,70 Н·м, а по результатам экспериментальной проверки – 3,42 Н·м. Разница – 27 %. Здесь различие также, вероятно, связано с тем, что в лабораторном эксперименте устанавливались все 6 зарядных стаканов с пружинами, что создавало дополнительную силу трения крышек об опорную пластину. Также дополнительные силы сопротивления возникали в коническом редукторе макетного образца, через который осуществлялся привод зарядного устройства, в то время как при моделировании виртуальный датчик прикладывался непосредственно к валу зарядного барабана и силы трения в сопряжениях не учитывались.

Выводы

1. Разработанная имитационная модель в программном комплексе «Универсальный механизм 9.1» позволяет определить кинематические и динамические параметры лесопосадочной машины, при которых подающий ап-

парат не будет препятствовать свободному выпадению брикета с саженцем, а момент на опорных колесах окажется достаточным для приведения дисков с захватами в движение.

2. Для предложенной конструкции лесопосадочной машины установлено, что сектор размыкателя должен иметь открытый угол 75° , при попадании в который крышка подающего механизма будет своевременно открываться и закрываться.

3. Для предотвращения удара крышки о саженец с брикетом и изменения его траектории необходимо установить пружину между крышкой и стаканом, внутри которого расположен брикет. Пружина должна обеспечивать напряжение сжатия 0,8 Н и момент сил трения в шарнире 0,001 Н·м.

4. В связи со значительным расстоянием между барабаном подачи и захватами необходимо предусмотреть корзину, предварительно улавливающую брикет с саженцем.

5. Определены геометрические параметры механизма, согласующие профиль кулачка с его движением вместе с диском и работой роликового толкателя таким образом, чтобы захваты в нужное время устанавливали брикет с саженцем в почву. Выявлена траектория движения брикета с саженцем.

6. Установлены силы, возникающие между роликом и кулачком. Найден требуемый крутящий момент на ступице диска посадочного аппарата – 8,00 Н·м и на валу посадочного барабана – 3,42 Н·м для работы лесопосадочного аппарата представленной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Бартенев И.М., Драпалюк М.В.* Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 117–133.

Bartenev I.M., Drapalyuk M.V. Improving the Technology of Reforestation in Cuttings with the Use of Energy-Efficient Tractors. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 5, pp. 117–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-117-133>

2. *Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н.* Имитационная модель для анализа кинематики лесопосадочного аппарата с двумя роторами // Изв. СПбЛТА. 2023. № 243. С. 197–209.

Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysych M.N. Simulation Model for the Analysis of the Kinematics of a Forest Planter with Two Rotors. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2023, no. 243, pp. 197–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.197-209>

3. *Григорьева О.И., Макуев В.А., Барышникова Е.В., Бурмистрова О.Н., Швецова В.В., Григорьев И.В., Иванов В.А.* Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3(55). С. 78–84.

Grigorieva O.I., Makuev V.A., Baryshnikova E.V., Burmistrova O.N., Shvetsova V.V., Grigoriev I.V., Ivanov V.A. Import Substitution Prospects for Artificial Reforestation Machine Systems. *Sistemy. Metody. Tehnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3(55), pp. 78–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-78-84>

4. *Каляшов В.А., До Гуан А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В.* Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1–47.

Kalyashov V.A., Do Tuan A., Hitrov E.G., Grigoreva O.I., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V. Modern Systems of Machinery and Technologies for Timber Harvesting and Reforestation in Mountain Forests. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163>

5. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Горбунов А.Ю., Дручинин Д.Ю. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 217–226.

Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Gorbunov A.Yu., Druchinin D.Yu. Development of the Forwarder Articulation Joint *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 217–226. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18>

6. Клубничкин Е.Е. Моделирование мобильности колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 1(140). С. 84–96.

Klubnichkin E.E. Modeling the Mobility of Wheeled Vehicles Equipped with Traction Devices. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* = Transactions of NNSTU named after R.E. Alekseev, 2023, no. 1(140), pp. 84–96. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_84

7. Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-роспуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 85–99.

Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V. Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drag. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 85–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>

8. Хитров Е.Г., Должиков И.С., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 126–134.

Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 126–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-126-134>

9. Bivainis V., Jotautienė E., Lekavičienė K., Mieldazys R., Juodišius G. Theoretical and Experimental Verification of Organic Granular Fertilizer Spreading. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 6, art. no. 1135. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061135>

10. Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the Movement of Hedge Cutter Links in the Simulink Application of the Matlab Package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, art. no. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012004>

11. Bukhtoyarov L., Kunickaya O., Urazova A., Perfiliev P., Druzyanova V., Egipko S., Burgonutdinov A., Tikhonov E. Substantiating Optimum Parameters and Efficiency of Rotary Brush Cutters. *Journal of Applied Engineering Science*, 2022, vol. 20, pp. 788–797. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36513>

12. Bukhtoyarov L.D., Maksimenkov A.I., Abramov V.V., Lysykh M.N. Research Units of Flexible Working Body Motion, Cutting Branches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 392, art. no. 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012073>

13. Bukhtoyarov L.D., Maksimenkov A.I., Lysykh M.N., Abramov V.V. Movement Simulation of Flexible Working Body Links in the Unity Cross-Platform Development Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 595, art. no. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012014>

14. Chen Y., Huang M.F., Shi B., Xiao M.M., Hu R.K., Tang J.S. Kinematic Analysis and Simulation of an A/C Axes Bi-Rotary Milling Head with Zero Transmission. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 625, pp. 146–150. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.625.146>
15. Gong H., Zeng Z., Tessier L., Guzman L., Yuan Z., Li S., Zheng W., Chen Y., Qi L. Survival on Land: A Dark-Grown Seedling Searching for Path. *Frontiers in Plant Science*, 2023, vol. 14, art. no. 1110521. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110521>
16. Guan Z., Mu S., Jiang T., Li H., Zhang M., Wu C., Jin M. Development of Centrifugal Disc Spreader on Tracked Combine Harvester for Rape Undersowing Rice Based on DEM. *Agriculture*, 2022, vol. 12(4), art. no. 562. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040562>
17. Guo X., Zeng J., Ma H., Zhao C., Qu L., Wen B. Dynamic Characteristics of a Shrouded Blade with Impact and Friction. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 15, pp. 209–226. <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0566-6>
18. Kuuluvainen T., Tahvonen O., Aakala T. Even-Aged and Uneven-Aged Forest Management in Boreal Fennoscandia: A Review. *AMBIO*, 2012, vol. 41, pp. 720–737. <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0289-y>
19. Ma H., Lu Y., Wu Z., Tai X., Li H., Wen B. A New Dynamic Model of Rotor–Blade Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 357, pp. 168–194. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.036>
20. Zhang X., Guan D., Li W., Sun D., Jin C., Yuan F., Wang A., Wu J. The Effects of Forest Thinning on Soil Carbon Stocks and Dynamics: A Meta-Analysis. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 429, pp. 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.027>

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

Научная статья

УДК 625.042.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-134-146

Особенности эксплуатации лесовозных дорог в весенне-зимний период

К.В. Ладейщиков[✉], аспирант; *ResearcherID*: [IZE-1449-2023](https://orcid.org/0009-0007-9643-0003),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9643-0003>

С.А. Чудинов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AEN-3285-2022](https://orcid.org/0000-0003-4492-8188),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; k1272@mail.ru[✉], chudinovsa@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 22.09.23 / Одобрена после рецензирования 18.12.23 / Принята к печати 20.12.23

Аннотация. Сезонные дороги не являются объектами капитального строительства. В отличие от всесезонных, они могут быть летнего и зимнего действия. При транспортном освоении лесов необходимы как всесезонные дороги с твердым покрытием, так и временные с грунтовым. Доля временных дорог составляет более 90 % от всех лесовозных дорог. Одна из основных проблем временных лесовозных дорог – неравномерная эксплуатация по сезонам, особенно летом. Сезонные дороги не имеют капитального покрытия, чаще это естественный грунт, подверженный, кроме механических воздействий, атмосферным, что наиболее проявляется в летне-осенний период. Поэтому вывоз около 80 % заготовленной древесины производится по зимним дорогам. Плотность временных дорог зависит от общей технологии ведения заготовки в определенной местности, включающей расстояние трелевки древесины и угол взаимного расположения лесных дорог. Работы по устройству дорог зимнего действия выполняются летом и зимой. Летом проводятся инженерные изыскания, определяется оптимальное направление будущей трассы, прорубается просека, готовится земляное основание, при необходимости устраиваются водопропускные сооружения. С наступлением холодов уплотняют и выравнивают грунт для ускорения его промерзания. При достаточном промерзании основания формируют снежно-ледяное покрытие. В статье рассмотрено влияние придорожных лесных насаждений на температуру воздуха около поверхности дороги, температуру почвы, блокирование солнечной радиации – факторы, которые имеют непосредственное отношение к общему сроку эксплуатации зимней дороги. Особое внимание уделено замедлению снижения прочности покрытия зимней дороги в тени от сохранных деревьев путем выбора оптимального направления трассы. Установлено и подтверждено замедление снижения прочности покрытия лесной грунтовой дороги на участках, где деревьями блокируется солнечная радиация, т. е. в тени. Разница падения прочности до минимальной составляет 33 дня. На основании результатов исследования сделан вывод о необходимости всесторонней проработки логистической стратегии организации перевозок круглых лесоматериалов по зимним дорогам.

Ключевые слова: зимние лесовозные дороги, эксплуатация дороги, направление трассы, оттаивание, модуль упругости, инсоляция, солнечная радиация

Для цитирования: Ладейщиков К.В., Чудинов С.А. Особенности эксплуатации лесовозных дорог в весенне-зимний период // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 134–146. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-134-146>

Original article

The Peculiarities of the Operation of Logging Roads in the Spring-Winter Period

Konstantin V. Ladeyshchikov[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [IZE-1449-2023](https://orcid.org/0009-0007-9643-0003),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9643-0003>

Sergey A. Chudinov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AEN-3285-2022](https://orcid.org/0000-0003-4492-8188),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; k1272@mail.ru[✉], chudinovsa@m.usfeu.ru

Received on September 22, 2023 / Approved after reviewing on December 18, 2023 / Accepted on December 20, 2023

Abstract. Seasonal roads are not capital construction objects. Unlike all-season ones, they can be of summer and winter action. During the transport development of forests, both all-season paved roads and temporary unpaved roads are required. The share of temporary roads is more than 90 % of all logging roads. One of the main problems of temporary logging roads is uneven seasonal operation, especially in summer. Seasonal roads do not have a permanent surface; more often it is natural soil, subject, except for mechanical impacts, to atmospheric ones, which is most evident in the summer-autumn period. Therefore, about 80 % of the harvested wood is exported via winter roads. The density of temporary roads depends on the general harvesting technology in a particular area, including the wood skidding distance and the angle of relative position of forest roads. Winter road construction works are carried out in summer and winter. In summer, engineering surveys are carried out, the optimal direction of the future route is determined, a clearing is cut, a roadbed is prepared, and if necessary, culverts are installed. With the onset of cold weather, the existing soil is compacted and leveled to accelerate its freezing. If the roadbed is sufficiently frozen, a snow-ice cover is formed. The article considers the influence of roadside forest plantations on the air temperature near the road surface, soil temperature, blocking solar radiation – the factors that are directly related to the overall service life of a winter road. Special attention is paid to slowing down the decrease in the winter road pavement strength in the shade of preserved trees by choosing the optimal route direction. The slowdown in the decrease in the pavement strength of the forest dirt road has been established and confirmed in areas where solar radiation is blocked by trees, i.e. in the shade. The difference in strength reduction to the minimum is 33 days. Based on the research results, it has been concluded that a comprehensive development of the logistics strategy for the organization of roundwood transportation via winter roads is necessary.

Keywords: winter logging roads, road operation, route direction, thawing, elastic modulus, insolation, solar radiation

For citation: Ladeyshchikov K.V., Chudinov S.A. The Peculiarities of the Operation of Logging Roads in the Spring-Winter Period. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 4, pp. 134–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-134-146>

Введение

Значительные расстояния, небольшие объемы лесозаготовок, скорость освоения лесных участков современной техникой и их многочисленность обуславливают то, что во многих случаях более эффективно вывозить основной объем древесины по временным дорогам зимой, продлевая срок их эксплуатации. Зимние дороги проще развивать, прокладывая или перенаправлять в новом месте, чем постоянные или используемые в другие сезоны, для строительства зимних дорог не требуется устройство многослойных конструкций земляного полотна и капитальных дорожных одежд [1, 21].

Срок эксплуатации временных лесовозных дорог определяется заранее и составляет не более 5 лет [4]. К временным дорогам относятся лесовозные ветки и лесовозные усы, их общая доля от всех лесовозных дорог – 90 %. На оставшуюся часть приходится лесовозные магистрали с капитальным типом покрытия, дороги общего пользования и некоторые лесовозные ветки – дороги, большей протяженности [17], чем обычные лесовозные ветки, и с низкой интенсивностью движения транспорта [4, 17, 19], что позволяет использовать их круглогодично.

Временные дороги не имеют постоянного твердого покрытия и в повышенной степени подвержены атмосферным и механическим воздействиям, особенно в летний период [23]. Вследствие этого древесину в основном вывозят зимой, по оборудованным полосам из замороженного грунтового основания, покрытого снегом и льдом [6]. Доля зимних дорог от всех временных составляет более 80 % [8]. Существующая плотность временных дорог недостаточна, ее требуемое значение зависит от общей технологии заготовки древесины в определенной местности [11, 18].

Актуальной задачей настоящего времени, которое характеризуется общим потеплением климата, является строительство зимних лесовозных дорог с увеличенным сроком эксплуатации: каждый дополнительный день использования дороги в весенний период дает прирост чистой прибыли [9].

Цель данной работы – планирование условий замедления снижения прочности покрытия зимней дороги в тени от сохранных деревьев путем выбора оптимального направления трассы, а также эксплуатационными мероприятиями в весенне-зимний период.

Объекты и методы исследования

Важные факторы, которые продлевают срок эксплуатации зимней дороги, – это температура и влажность в районе придорожной полосы, а также температура поверхности покрытия дороги при прочих равных условиях, таких как состав транспорта и интенсивность его движения. Температура поверхности дороги, в свою очередь, зависит от типа покрытия [16] и продолжительности воздействия прямых солнечных лучей в весеннее время.

Естественной преградой в лесу, замедляющей прогрев поверхности земли и, соответственно, зимней дороги, увеличивая срок ее эксплуатации, являются растущие деревья, особенно хвойных пород, которые в ясную солнечную погоду образуют на поверхности дороги тени. Важно прокладывать трассу зим-

ней лесовозной дороги с учетом ее максимального перекрытия тенью от высоких преград – деревьев [13].

При этом необходимо помнить, что лес сам по себе влияет на климат места, хотя однозначных выводов об этих влияниях учеными не сделано. Отсутствует информация о воздействии леса на эксплуатацию дороги при различных направлениях трассы.

Лес или лесные придорожные насаждения в первую очередь влияют на температуру почвы. Почва в лесу имеет более высокую температуру, чем на открытых участках: разница колеблется от 5 до 10 °С [5]. Это зависит от ряда факторов, например снежного покрова, ветра и т. д. Соответственно, грунт на участке в лесу промерзает на меньшую глубину в отличие от открытых участков.

В целях изучения влияния придорожных лесных насаждений на продолжительность эксплуатации зимних дорог было проведено исследование прочности грунтового покрытия в весенний период, когда дорога освободилась от снежного и снежно-ледяного покровов (на примере периода март–апрель 2023 г.), в зависимости от внешних факторов и условия

$$E_{\text{осн}} \geq E_{\text{упр min}},$$

где $E_{\text{осн}}$ – модуль упругости основания, МПа; $E_{\text{упр min}}$ – минимально требуемый модуль упругости, $E_{\text{упр min}} = 50$ МПа (при невыраженном грузообороте) [2].

Для продолжительной эксплуатации лесовозной дороги определяющими факторами являются расположение трассы и расстояние до леса.

Исследован участок лесной грунтовой дороги вблизи г. Екатеринбурга (рис. 1). Грунт на данной дороге представлен тяжелым суглинком.



Рис. 1. Экспериментальная лесная дорога: 1 – открытый участок; 2 – блокированный деревьями высотой до 8 м участок; 3 – открытый с обеих сторон дороги участок; 4 – ограниченный лесным массивом с северной стороны, но открытый с южной участок; 5 – открытый участок; 6 – блокированный деревьями высотой до 25 м участок

Fig. 1. An experimental logging road: 1 – an open area; 2 – an area blocked with trees up to 8 m high; 3 – an area open on both sides of the road; 4 – an area limited by forest on the north side, but open on the south side; 5 – an open area; 6 – an area blocked with trees up to 25 m high

Прочность покрытия грунтовой дороги устанавливалась прибором ПДУ-МГ4 – измерителем модуля упругости грунтов и оснований дорог при динамическом нагружении (рис. 2). Прибор предназначен для косвенного измерения

модуля упругости грунта на основе зависимости амплитуды перемещения, приложенного к грунту, от ударной силы груза и преобразования этих деформаций тензометрическим датчиком в аналоговый электрический сигнал, который далее обрабатывается и выводится на дисплей.

Модуль упругости можно определить из выражения

$$E_{\text{упр}} = \frac{\pi d \sigma}{4L} (1 - \mu^2),$$

где d – диаметр нагружаемого штампа, м; σ – контактное напряжение, МПа; L – амплитуда перемещения, м; μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0,35$.

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2} (1 - \mu^2),$$

где P – сила удара, Н.

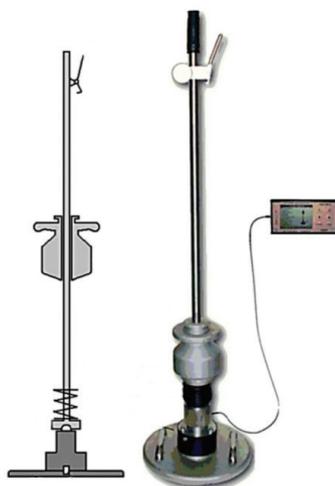


Рис. 2. Прибор ПДУ-МГ4

Fig. 2. The device PDU-MG4

В весенний период существенно возрастает тепляющее воздействие солнечных лучей на поверхность дороги, в частности прямое воздействие с 11:00 до 15:00.

В число существенных факторов, влияющих на прочность покрытий дороги как на открытых участках, так и на участках, где солнечные лучи блокированы деревьями, входит солнечная радиация и продолжительность ее прямого воздействия в виде излучения света и тепла. Различают прямую солнечную радиацию – часть радиации, которая достигает земной поверхности в неизменном виде, и рассеянную – она претерпела рассеяние в атмосфере из-за ее встречного излучения. Под потоком любой из разновидностей солнечной радиации принято понимать количество лучистой энергии, приходящей в единицу времени на единицу площади, расположенной в направлении, перпендикулярном солнечным лучам [7]. Интенсивность прямой солнечной радиации, продолжительность солнечного сияния в допосуденное и послепосуденное время и температура окружающей среды влияют на скорость оттаивания поверхности дороги.

Под инсоляцией подразумевается прямая солнечная радиация. Инсоляция также бывает прямой и рассеянной. Она зависит от высоты стояния Солнца над горизонтом. У поверхности Земли при высоте стояния Солнца 40° солнечная радиация имеет следующий состав: инфракрасных лучей – 59 %, видимых – 40 %, ультрафиолетовых – 1 %.

Участки дороги можно охарактеризовать в т. ч. общей освещенностью, которая имеет существенные различия для случаев, когда есть прямая солнечная инсоляция и когда прямые солнечные лучи не достигают поверхности дороги (образуется тень).

Уровень освещенности (лк) измеряется в видимой области спектра с длиной волны 380–760 нм и определяется из выражения

$$E_{\text{осв}} = \frac{F}{S},$$

где F – световой поток, лм; S – площадь освещаемой поверхности, м².

Здесь

$$F = \frac{\varepsilon}{t},$$

где ε – количество энергии, Дж; t – время, с, мин, ч.

В ходе исследования на участке дороги проводились измерения уровней освещенности с применением люксметра ТКА-ПКМ 31.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассматриваемый участок дороги протяженностью 1,5 км имеет направление с запада на восток, на 750 м из всей протяженности сконцентрированы различные места воздействия внешних факторов: открытые участки; участки дороги с блокированием солнечных лучей с 11:00 до 15:00; ограниченные с северной стороны лесными массивами, но открытые с юга участки и т. д. [15].

В зимний период тепляющее воздействие солнечных лучей на поверхность дороги незначительно в силу низкого склонения Солнца и падения лучей вскользь. Зимой модуль упругости снежной или снежно-ледяной поверхности дороги более 150 МПа. При потеплении воздуха покрытие начинает терять прочность, на открытых для солнечных лучей участках скорость уменьшения прочности повышена.

Но и для участков, которые открыты для солнечных лучей с южной стороны, скорости потери прочности покрытия разные. Решающим является наличие с северной стороны лесного массива. На рис. 3 приведен пример изменения модуля упругости поверхности на открытых участках № 3, 4. Близко к участку № 4 с северной стороны произрастает лес. Расстояние от края леса до ближайшего к нему края дороги составляет 1–2 м. Видно тепляющее воздействие на зимнюю дорогу лесного массива при равных температуре воздуха и продолжительности солнечной радиации. Задержка понижения прочности покрытия при сравнении двух участков составляет более 15 сут.

На рис. 4 для сравнения показано состояние поверхности дороги на участках № 3 и 4 в один день – 26.03.

Рекомендуемое расстояние от края леса до дороги при направлении с запада на восток – не менее 6 м, при условии, что это пространство зимой будет использоваться для отгрузки убираемого с дороги снега, который в весенний период будет долго лежать и уменьшать тепляющее воздействие леса. На таких участках на покрытии зимней дороги снижается частота колебаний при переходе его температуры через 0 °С в большую или меньшую сторону, когда происходит оттаивание и промерзание, – дорога меньше подвержена разрушениям от транспортного воздействия и в целом увеличивается срок ее эксплуатации.

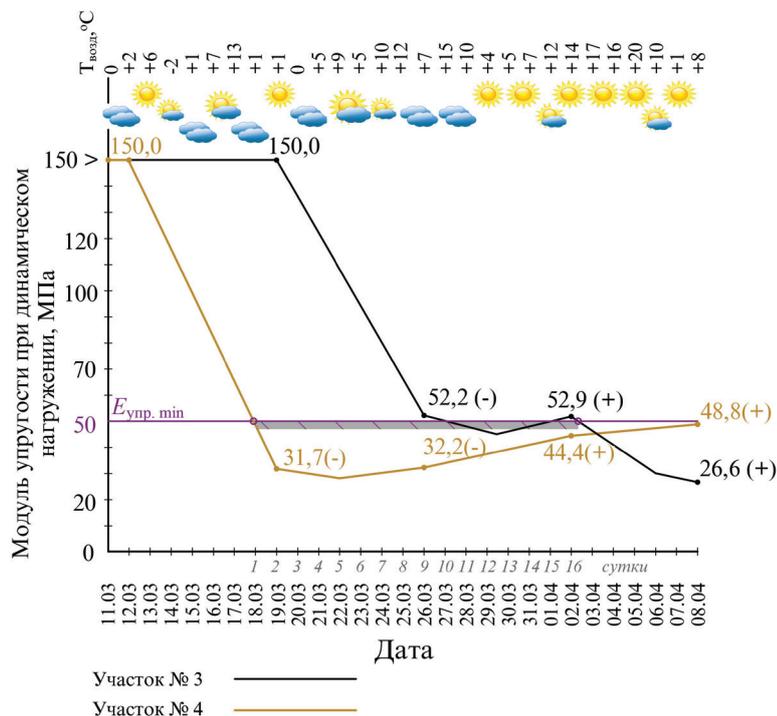


Рис. 3. Изменение модуля упругости поверхности зимней дороги на участках № 3 и 4 (- – сырая поверхность дороги; + – сухая (мерзлая))

Fig. 3. The change in the elastic modulus of the winter road surface in sections no. 3 and 4 (- – the road surface is wet; + – the road surface is dry (frozen))



Рис. 4. Состояние поверхности дороги на 26.03 на участках: а – № 3; б – № 4

Fig. 4. The road surface condition as of March 26 in sections: а – no. 3; б – no. 4

Чтобы разработать мероприятия для продления срока эксплуатации дороги, необходимо знать общий срок эксплуатации конкретной дороги [24] с точными датами начала и окончания использования этого отрезка пути. В работе [12] обозначена сумма отрицательных температур от -100 до -130 °C, при достижении которой рекомендуется начинать

обустройство зимней дороги. Общий срок строительства зимника составляет до 30 календарных дней.

Еще более значительную задержку снижения модуля упругости поверхности зимней дороги видно при сравнении показателей открытых солнечным лучам участков и участков, где солнечные лучи блокированы деревьями. На рис. 5 показано, что на открытых участках поверхность дороги в период с 12.03 по 26.03 утрачивает требуемую для движения транспорта прочность, обуславливая необходимость прекращения эксплуатации дороги до просушки грунта на необходимую толщину. При этом, как показывает обследование, грунт на участке № 1 в сухом состоянии имеет низкую прочность, требуется его укрепление, например, местными каменными материалами [20, 22].

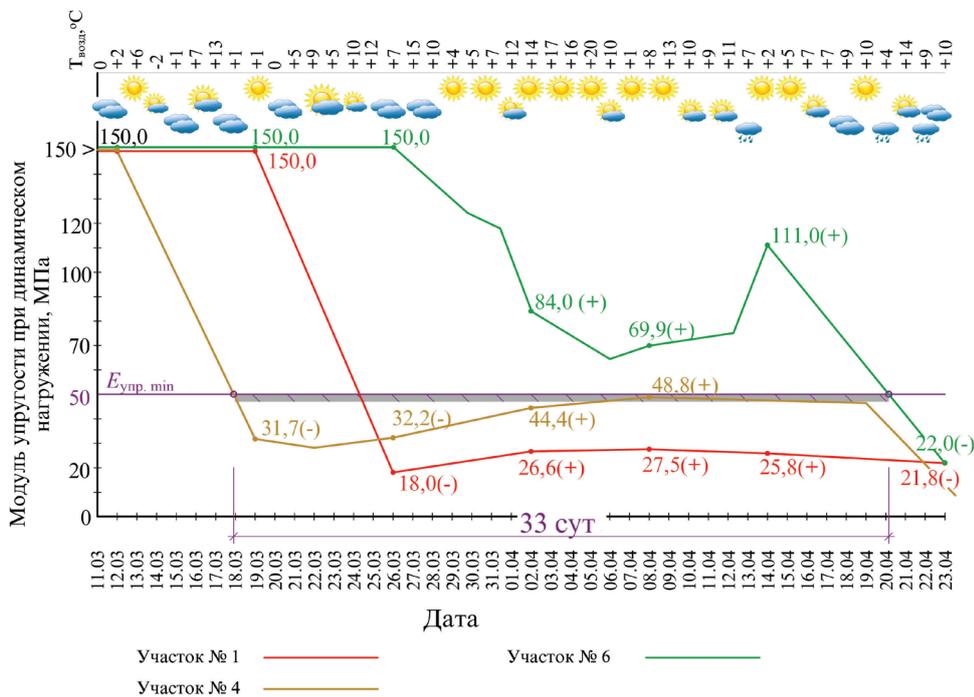


Рис. 5. Изменение модуля упругости поверхности зимней дороги на участках № 1, 4, 6 (-; + – см. рис. 3)

Fig. 5. The change in the elastic modulus of the winter road surface in sections no. 1, 4 and 6 (-; + – see fig. 3)

Участок № 6 расположен в тени сосен, достигающих высоты 25 м, и оттаивание поверхности дороги идет значительно медленнее по сравнению с другими участками. В общем тренде задержка составляет примерно 20 сут. При этом происходит набор прочности в периоды заморозков: 05–07.04; 12–14.04; в то время как для открытых участков в эти даты характерна естественная просушка поверхности.

Обследованием установлено замедление снижения прочности покрытия лесной грунтовой дороги на заблокированных участках в сравнении с требуемым модулем упругости и модулем упругости поверхности на открытых участках (рис. 6). Разница составляет 33 дня.

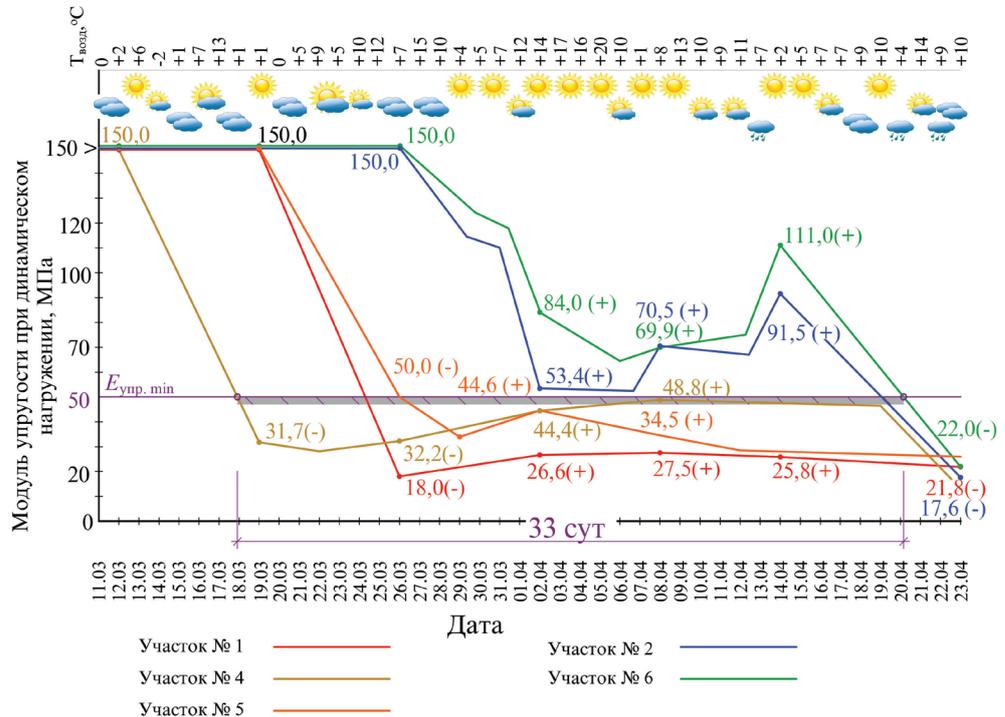


Рис. 6. Изменение модуля упругости поверхности зимней дороги на участках № 1, 2, 4–6 (-; + – см. рис. 3)

Fig. 6. The change in the elastic modulus of the winter road surface in sections no. 1, 2, 4, 5 and 6 (-; + – see fig. 3)

На рис. 3, 5, 6 видно, что грунтовая экспериментальная лесная дорога зимнего действия на некоторых сухих участках имеет прочность ниже минимальной требуемой по критерию упругого прогиба и необходимо укрепление этих участков. Также при натурных обследованиях установлено отсутствие нормативного обслуживания данной дороги: нет поперечных уклонов покрытия, обнаружены многочисленные выбоины и прочие дефекты (см. рис. 4).

Освещенность открытых участков № 1, 3–5 в полдень в период проведения исследования в безоблачные дни составляла в среднем 70 000 лк, блокированных участков № 2, 6 – 6 500 лк. По приведенной разнице в значениях показателя можно сделать вывод о наличии прямой инсоляции, а с учетом угла склонения Солнца, географических координат местности, продолжительности его воздействия – подсчитать количество солнечной энергии на единицу площади при безоблачной погоде.

Освещенность открытых участков в полдень в пасмурные дни была в среднем 20 000 лк, блокированных – 10 000 лк. Повышенная освещенность блокированных участков в пасмурные дни обусловлена увеличенным уровнем рассеянной солнечной радиации. В любом случае, в ясный или пасмурный день значения освещенности свидетельствуют о прямом воздействии солнечных лучей или показывают наличие тени.

Обследованием также подтверждено, что при средней температуре воздуха +15 °С температура воздуха на открытых участках была на 5–7 °С выше, чем в тени.

Доказано влияние сохраненных придорожных лесонасаждений на температуру окружающего воздуха [5] в месте, где проложена трасса.

Снижение воздействия солнечной радиации на почву обеспечивается в разной степени и пологом леса. Сомкнутый полог может задерживать до 99 % солнечной радиации. В сравнении с открытой местностью уменьшение количества солнечной радиации для конкретной территории по причине ее поглощения сосновыми насаждениями составляет 45 %, лиственными – 30 %, еловыми – 25 % [10].

Полог леса, когда кроны деревьев смыкаются в одном или нескольких ярусах, – лучшее внешнее условие для продления срока эксплуатации зимней дороги. Полог леса является реальной деятельной поверхностью, особенно если разница высот деревьев не более 15 %, и сравним с поверхностью почвы, но деревья вследствие транспирации хвои меньше нагреваются в ясную погоду днем по сравнению с открытой поверхностью почвы.

В лесу, в отличие от открытой местности, температура доходит до поверхности почвы с некоторой задержкой [5]. При весеннем нагревании крон деревьев холодный воздух опускается вниз, поддерживая промерзлое состояние почвы. Разность температур «лес–поле» зимой небольшая, весной и летом увеличивается с возрастанием температуры. Распределение температуры воздуха в глубине леса, на опушке или открытой местности (рядом с лесом) зависит от пород, составляющих насаждение, густоты его произрастания и возраста [5].

Логистическая стратегия организации перевозок круглых лесоматериалов от пункта заготовки до перерабатывающего предприятия должна быть направлена на поиск оптимального проекта основных трасс, т. е. зимних дорог. Под проектом понимается выбор наилучшего организационного и технического решения, планирование и своевременное строительство лесовозных дорог. Все это позволяет достичь максимального срока службы зимних лесовозных дорог и в итоге повысить эффективность перевозок [3, 14].

Выводы

1. Сохраненные придорожные насаждения оказывают прямое влияние на эксплуатационный срок зимних лесовозных дорог, как продлевая, так и сокращая его в весенний период. При планировании направлений трасс необходимо временно сохранять лесные насаждения, тень от которых перекрывает проезжую часть в период с 11:00 до 15:00.

2. Установлено, что в районе, где лесной массив расположен с севера, а южная сторона подвержена прямой солнечной радиации, прокладывая трассу дороги необходимо на расстоянии не менее 6,0 м от леса. В процессе эксплуатации дороги при уборке излишнего снега его необходимо располагать на этой полосе. Такое устройство дороги позволит на 15 сут продлить период, когда прочность покрытия дороги при прочих равных климатических условиях будет соответствовать норме.

3. Выявлено наилучшее направление дороги – с запада на восток – с сохранением лесонасаждений с южной стороны и минимальным расстоянием от них до проезжей части. Замедление снижения прочности покрытия в сравнении с требуемым модулем упругости на заблокированных и открытых участках составляет 33 дня.

4. Другое предпочтительное направление трассы – с юго-востока на северо-запад, когда прямые солнечные лучи в дополуночное время воздействуют на поверхность дороги. При ином направлении необходимо уборку снега зимой выполнять в северную сторону. Если трасса планируется с севера на юг, ее лучше расположить по центру открытой местности, а если в лесу – то ширину отвода трассы необходимо делать минимальной – 8,0 м для однополосных дорог и 12,0 м для двухполосных.

5. Освещенность открытых участков в полдень в безоблачные дни составляет в среднем 70 000 лк, блокированных участков при прочих равных условиях – 6 500 лк. По приведенной разнице в значениях освещенности можно сделать заключение о наличии прямого солнечного воздействия. Угол направления трассы по отношению к северу влияет на общую продолжительность прямого солнечного облучения дороги.

6. Подтверждено, что температура окружающего воздуха на открытых участках на 5–7 °С выше, чем в тени, при средней температуре +15 °С, что напрямую связано с влиянием лесных насаждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Булдаков С.И., Мануковский А.Ю., Ладейщиков Н.В., Ладейщиков К.В., Тамбовцева С.И. Основные технологические операции при строительстве автомобильных дорог. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 128 с.

Buldakov S.I., Manukovskiy A.Yu., Ladeyshchikov N.V., Ladeyshchikov K.V., Tambovtseva S.I. *Basic Technological Operations in the Construction of Motorways*. Ekaterinburg, USFEI Publ., 2022. 128 p. (In Russ.).

2. Булдаков С.И., Савсюк М.В. Транспорт леса. Т. 1. Автомобильные лесовозные дороги. Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. 97 с.

Buldakov S.I., Savsyuk M.V. *Forest Transportation. Vol. 1. Automobile Logging Roads*. Ekaterinburg, USFEI Publ., 2016. 97 p. (In Russ.).

3. Еремеева Л.Э. Основы лесопромышленной логистики. Сыктывкар: СЛИ, 2014. 208 с.

Eremeyeva L.E. *The Basics of Forestry Logistics*. Syktyvkar, SFI Publ., 2014. 208 p. (In Russ.).

4. Иванкович А.С., Ковалевский В.М., Кудрявцева А.П., Дубинин Д.А. Временные лесовозные дороги. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 176 с.

Ivankovich A.S., Kovalevskiy V.M., Kudryavtseva A.P., Dubinin D.A. *Temporary Logging Roads*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 176 p. (In Russ.).

5. Короткевич В.Н. Обзор работ по изучению микроклимата. Л.: ЦУЕГМС. Ленингр. отд., 1936. 82 с. (Тр. Гл. геофиз. обсерватории. Климатология / Центр. упр. единой гидрометеорол. службы СССР; Вып. 6, 2).

Korotkevich V.N. *The Review of Papers on the Study of Microclimate*. Leningrad, Central Directorate of the Unified Hydrometeorological Service (Leningrad Department) Publ., 1936. 82 p. (In Russ.).

6. Лукашевич В.М. Обоснование комплектов и режимов работы лесосечных и лесотранспортных машин с учетом сезонности лесозаготовительных работ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2007. 18 с.

Lukashevich V.M. *Justification of Sets and Operating Modes of Logging and Timber Transport Machines, Taking into Account the Seasonality of Logging Operations*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Petrozavodsk, 2007. 18 p. (In Russ.).

7. Лукина И.В., Максимов И.И., Деревянных Е.А., Васильева О.Г. Анализ влияния солнечной радиации на рост растений // Вестн. Чуваш. гос. аграр. ун-та. 2022. № 2(21). С. 92–100.

Lukina I.V., Maksimov I.I., Derevyannykh E.A., Vasilieva O.G. Analysis of the Influence of Solar Radiation on Plant Growth. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik Chuvash State Agrarian University, 2022, no. 2(21), pp. 92–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.48612/vch/bda9-eb6e-7f75>

8. Мохирев А.П., Горяева Е.В., Мохирев М.П., Ившина А.В. Планирование сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 176–185.

Mokhirev A.P., Goryaeva E.V., Mokhirev M.P., Ivshina A.V. Planning of Operations of Winter Logging Roads on the Basis of Analysis of Climate Data Statistics. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 176–185. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5b2406175e7765.44768086

9. Мохирев А.П., Зырянов М.А., Медведев С.О., Брагина Н.А. Анализ влияния климатических условий на начало эксплуатации летних лесовозных дорог // Успехи современ. естествознания. 2020. № 9. С. 13–19.

Mokhirev A.P., Zyryanov M.A., Medvedev S.O., Bragina N.A. Analysis of the Influence of Climate Conditions on the Start of Operation of Summer Logging Roads. *Uspekhi sovremenno ego estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2020, no. 9, pp. 13–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37464>

10. Незавитин А.Г., Таран И.В., Бокова Т.И., Логинов С.И., Наплекова Н.Н., Осинцева Л.А., Чермерис М.С. Экологическая роль лесов в Сибири // Вестн. НГАУ. 2015. № 3(36). С. 43–53.

Nezavitin A.G., Taran I.V., Bokova T.I., Loginov S.I., Naplekova N.N., Osintseva L.A., Chemeris M.S. Ecological Role of Forests in Siberia. *Vestnik NGAU (Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet)* = Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University), 2015, no. 3(36), pp. 43–53. (In Russ.).

11. Проектирование, строительство и эксплуатация лесных дорог: метод. рекомендации / М-во стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва Рос. Федерации – Федер. центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в стр-ве. М., 2018. 174 с.

Design, Construction and Operation of Forest Roads: Methodological Guide. Moscow, Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, Federal Centre for Regulation, Standardization and Conformity Assessment in Construction, 2018. 174 p. (In Russ.).

12. Прокопьев Е.А., Крутских Н.В., Рязанцев П.А., Рослякова Н.А. Сбор данных для моделирования влияния климата на экономику (на примере лесозаготовок в Республике Карелия) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 1. С. 273–284.

Prokopyev E.A., Krutskih N.V., Ryazantsev P.A., Roslyakova N.A. Data Mining for Modelling the Climate Influence on the Economy (in the Case of Logging in the Republic of Karelia). *InterCarto. InterGIS*, 2018, vol. 24, part. 1, pp. 273–284. (In Russ.). <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-1-24-273-284>

13. Чудинов С.А., Ладейщиков К.В. Увеличение сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог при блокировании солнечных лучей // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ: сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БГТУ, 2022. С. 78–82.

Chudinov S.A., Ladeyshchikov K.V. Increasing the Service Life of Winter Logging Roads when Blocking the Solar Rays. *State and Prospects for the Development of the Forestry Complex in the CIS Countries: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference*. Minsk, BSTU Publ., 2022, pp. 78–82. (In Russ.).

14. Чудинов С.А., Ладейщиков К.В. Строительство зимних лесовозных дорог с увеличенным сроком эксплуатации // Научное творчество молодежи – лесному ком-

плексу России: материалы XIX Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, УГЛТУ. Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. С. 702–707.

Chudinov S.A., Ladeyshchikov K.V. Construction of Winter Logging Roads with Extended Service Life. *Scientific Creativity of Youth for the Russian Forest Complex: Proceedings of the XIX All-Russian (National) Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates*. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forestry Technical University, Ekaterinburg, USFEI Publ., 2023, pp. 702–707.

15. Чудинов С.А., Ладейщиков К.В. Особенности организации транспортировки лесоматериалов по зимним лесовозным дорогам // Логист. системы в глоб. экономике. 2023. № 13. С. 155–159.

Chudinov S.A., Ladeishchikov K.V. Features of the Organisation for Timber Transportation on Winter Timber Roads. *Logisticheskiye sistemy v global'noy ekonomike = Logistic Systems in Global Economics*, 2023, no. 13, pp. 155–159. (In Russ.).

16. Чудинов С.А., Ладейщиков К.В. Увеличение сроков эксплуатации сезонных дорог зимнего действия // Железнодорожный транспорт и технологии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. / УрГУПС. Вып. 1(249). Екатеринбург: УрГУПС, 2023. С. 118–121.

Chudinov S.A., Ladeyshchikov K.V. Increasing the Service Life of Seasonal Winter Roads. *Railway Transport and Technologies: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Ekaterinburg, USURT Publ., 2023, iss. 1(249), pp. 118–121. (In Russ.).

17. Borozna A.A., Skachek D.A., Naskovets M.T., Mokhov S.P., Golyakevich S.A. Industrial Approbation of Temporary Road Structures for Transport-Assisted Exploitation of Forests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 817, art. no. 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012006>

18. Brockenbrough R.L. *Highway Engineering Handbook*: 3rd ed. New-York, McGraw-Hill, 2009. 885 p.

19. Dittmer M.H. Efforts to Reduce Construction Costs of Logging Roads in Muskeg and Wet Soils in Southeast Alaska. *Transportation Research Record*, 1987, no.1106, pp. 267–273.

20. Holzleitner F., Fritz M., Sokol W., Zott F., Kanzian C. Predicting Forest Road's Bearing Capacity Using Smart Sensing Technology. *NB NORD2020: Forest Operations for the Future*, 2020, pp. 27–32.

21. Jones C.J.F.P., Glendinning S., Huntley D.T., Lamont-Blask J. Soil Consolidation and Strengthening Using Electrokinetic Geosynthetics – Concepts and Analysis. *Geosynthetics*. 2006, pp. 411–414.

22. Kaakkurivaara T. Innovative Methods for Measuring and Improving the Bearing Capacity of Forest Roads. *Dissertationes Forestales 251*, 2018. 57 p. <https://doi.org/10.14214/df.251>

23. Smirnov M., Andrianov Yu., Chernyakevich V. Technological Modernization of Forest Roads Construction in Russia. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, iss. 3, pp. 328–332. <https://doi.org/10.5937/jaes16-17071>

24. Varol T., Ozel H.B., Ertugrul M., Emir T., Tunay M., Cetin M., Sevik H. Prediction of Soil-Bearing Capacity on Forest Roads by Statistical Approaches. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, vol. 193, art. no. 527. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09335-0>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 691.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158

**Эксплуатационные характеристики
древесно-полимерных композитов
на основе ацетилированного древесного наполнителя**

А.А. Прокопьев[✉], аспирант; *ResearcherID: [HTM-4658-2023](https://orcid.org/0009-0008-8106-364X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8106-364X>

Н.Р. Галяветдинов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: [H-8681-2016](https://orcid.org/0000-0003-4360-7112)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>

Р.Р. Сафин, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. Карла Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; prokopenv.anatolij@mail.ru[✉],
nour777@mail.ru, cfaby@mail.ru

Поступила в редакцию 10.11.23 / Одобрена после рецензирования 12.02.24 / Принята к печати 15.02.24

Аннотация. Спрос на композиционные материалы растет с каждым годом. В связи с этим конкурентоспособность конкретного продукта определяется прежде всего соотношением цены и качества. Самым рациональным вариантом производства древесно-наполненных композитов является использование материалов с повышенными эксплуатационными свойствами. На сегодняшний день именно эксплуатационные качества композиционных материалов наиболее значимы не только для конечных потребителей, но и для производителей. В связи с этим в производстве древесно-наполненных композитов для повышения их эксплуатационных характеристик применяются различные способы предварительной обработки древесины – термомодифицирование, ацетилирование, фурфулирование, сверхвысокочастотная обработка, обработка щелочами, использование различных добавок и т. д. Перспективным способом улучшения физико-механических свойств древесно-наполненных материалов является ацетилирование, механизм которого заключается в образовании ацетильных групп в древесине в процессе обработки. Для уменьшения издержек производства и стоимости конечного продукта возможно использование более дешевого прекурсора (например, ледяной уксусной кислоты вместо уксусного ангидрида) с возможностью интенсификации процесса пропитки. В данной статье представлены результаты получения древесно-наполненных композитов на основе ацетилированной древесной муки березы с ее различной долей в составе. Влияние введения в состав композиции ацетилированного древесного наполнителя на эксплуатационные свойства композитов (стираемость, морозостойкость, прочность на изгиб) оценивали по сравнению с контрольными образцами из

необработанной древесной муки березы. Влияние на структуру древесной муки березы ацетилирования ледяной уксусной кислотой характеризовали с помощью ИК-Фурье-спектроскопии. ИК-спектры контрольного и ацетилированного образцов содержат полосы поглощения, относящиеся к соответствующим группам целлюлозы и лигнина лиственных пород. Коэффициенты истираемости и морозостойкости для древесно-наполненного композита на основе ацетилированной древесной муки березы меньше в среднем в 1,5–2 раза применительно ко всем составам по сравнению с контрольными образцами. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что ацетилирование древесной муки как способ предварительной обработки наполнителя с целью повышения эксплуатационных свойств конечной продукции перспективен при реализации на производстве древесно-наполненных материалов.

Ключевые слова: древесная мука, ацетилирование, ледяная уксусная кислота, древесно-наполненный композит, ИК-Фурье-спектроскопия, предел прочности при изгибе, истираемость, морозостойкость

Благодарности: Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Нanomатериалы и нанотехнологии» КНИТУ при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Для цитирования: Прокопьев А.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 147–158. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-147-158>

Original article

Performance Characteristics of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler

Anatoliy A. Prokopiev[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [HTM-4658-2023](https://orcid.org/0009-0008-8106-364X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8106-364X>

Nour R. Galyavetdinov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [H-8681-2016](https://orcid.org/0000-0003-4360-7112), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>

Ruslan R. Safin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; prokopev.anatolij@mail.ru[✉], nour777@mail.ru, cfaby@mail.ru

Received on November 10, 2023 / Approved after reviewing on February 12, 2024 / Accepted on February 15, 2024

Abstract. The demand for composite materials is growing every year. In this regard, the competitiveness of a particular product is determined primarily by the price-quality ratio. The most rational option for the production of wood-filled composites is using the materials with the increased performance characteristics. To date, it is the performance characteristics of modern composite materials that are the most significant, not only for final consumers, but also for manufacturers. In this regard, to improve performance characteristics in the production of wood-filled composites, various methods of pre-treatment of wood are used – thermal modification, acetylation, furfuration, ultra-high-frequency processing, alkali treatment, the use of various additives, etc. A promising way to improve the physical and mechanical properties of wood-filled materials is acetylation, whose mechanism consists in



the formation of acetyl groups in wood during processing. To reduce production costs and the cost of the final product, it is possible to use a cheaper precursor (for example, icy acetic acid instead of acetic anhydride) with the possibility of intensifying the impregnation process. This article presents the results of obtaining wood-filled composites based on acetylated birch wood flour with its various proportions in the composition. The effect of introducing acetylated wood filler into the composition on the performance properties of composites (abrasability, frost-resistance, flexural strength) has been evaluated in comparison with control samples made from untreated birch wood flour. The effect of acetylation with glacial acetic acid on the structure of birch wood flour has been characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy. The IR-spectra of the control and acetylated samples contain absorption bands belonging to the corresponding groups of cellulose and lignin of hardwoods. The abrasability and frost-resistance coefficients for a wood-filled composite based on acetylated birch wood flour are on average 1.5–2 times lower for all compositions compared to control samples. The results of the research allow us to conclude that acetylation of wood flour as a method of pre-treatment of the filler in order to improve the performance characteristics of the final product is promising for implementation in the production of wood-filled materials.

Keywords: wood flour, acetylation, glacial acetic acid, wood-filled composite, IR-Fourier spectroscopy, ultimate flexural strength, abrasability, frost-resistance

Acknowledgements: The research was carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Nanomaterials and Nanotechnology” of Kazan National Research Technological University with the financial support of the project from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the grant no. 075-15-2021-699.

For citation: Prokopiev A.A., Galyavetdinov N.R., Safin R.R. Performance Characteristics of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 147–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-147-158>

Введение

Необходимость использования экологически чистых ресурсов возникла в связи с концепцией рационального природопользования. С ростом спроса на пластмассы и древесные материалы увеличилось загрязнение окружающей среды. Следовательно, в строительной отрасли быстро повышается интерес к полимерным композитам, армированным натуральными волокнами, главным образом для замены композитов из синтетических волокон. Особый интерес представляет производство экологически чистых композиционных материалов. Современные материалы, используемые для изготовления композитов на основе древесины, имеют недостатки, такие как низкое межфазное сцепление и, соответственно, более быстрый износ [13]. Для решения данной проблемы существуют химические способы предварительной обработки древесины, одним из которых является ацетилирование.

Большинство авторов [2–6, 8–11, 14–20, 22–24] относят ацетилирование древесного наполнителя и цельной древесины как самостоятельного строительного материала к наиболее эффективным методам обработки. Это не только позволяет улучшить физико-механические свойства материалов, но и придает им биостойкость, защищая композит и цельную древесину от различных насекомых-вредителей, а также от гниения из-за заражения грибами.

В статьях зарубежных исследователей поставлен вопрос использования предварительно ацетилированной древесины как в качестве самостоятельного материала, так и при получении древесно-наполненных композитов.

Авторы [12] рассматривали ацетилирование как один из распространенных процессов модификации древесины. Предлагали использование модифицированного шпона для компонентов транспортных средств, изучая при этом устойчивость ацетилированного шпона из сосны к автомобильным химикатам (дистиллированная вода, ацетон, дизельное топливо, бензин, антифриз). Образцы подвергали воздействию химических веществ с последующим испытанием на растяжение, чтобы оценить влияние этих химических веществ на механические свойства шпона. Наибольшее увеличение массы образца наблюдалось при погружении в дистиллированную воду. При этом статистически значимого действия химических веществ на прочность при растяжении не отмечено.

В работе [21] древесную муку подвергали реакции с малеиновым ангидридом. Обработанный образец смешивали с диаллилфталатом перед горячим прессованием. Все модифицированные образцы показали хорошие результаты при испытаниях на водопоглощение. Они имели большую стабильность в воде, чем необработанные. ИК-спектроскопия позволила установить, что ненасыщенные малеатные компоненты вступили в реакцию с диаллилфталатом, что, в свою очередь, могло повлиять на конечные свойства композита.

В статье [7] проанализированы механические свойства различных композитов на основе древесины сосны, дуба, рапсовой соломы и изотактического полипропилена. Поверхность наполнителя была ацетилирована уксусным ангидридом для улучшения совместимости гидрофильных лигноцеллюлозных компонентов с гидрофобной полипропиленовой матрицей. Наполнитель в количестве 30 мас. ч. смешивали с полипропиленом, полученную смесь экструдировали и формовали под давлением. Химическая модификация оказалась успешной в повышении прочности композитов на основе ацетилированного наполнителя. Результаты, касающиеся механических свойств композитов, их эстетического качества и возможности применения в различных областях, указывают на рентабельность производства лигноцеллюлозных композитов со связующим из полипропилена. Композиты с древесиной или рапсовой соломой имеют сходные прочность при разрыве и твердость. Тип лигноцеллюлозных компонентов и используемая химическая обработка не влияют на эти механические параметры.

Обзор существующих исследований доказывает эффективность ацетилирования как способа предварительной обработки, однако возможность использования ледяной уксусной кислоты в качестве реагирующего агента изучена в недостаточной степени.

Цель работы – рассмотрение влияния ацетилирования в среде ледяной уксусной кислоты на химическую структуру древесного наполнителя, а также сравнительная характеристика эксплуатационных свойств различных составов древесно-наполненного композиционного материала, изготовленного из обычного и модифицированного древесного наполнителя.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили древесная мука березы, ацетилированная в среде ледяной уксусной кислоты по ГОСТ 61–75 при комнатной температуре в течение 72 ч и высушенная до постоянной массы в вакуумно-сушильном шкафу Memmert 400 при температуре 100 °С, а также образцы композитов в форме балочек длиной 80 мм, шириной 10 мм и толщиной 5 мм, полученных как из обычного, так и из ацетилированного древесного наполнителя (см. таблицу).

Состав исследованных древесно-наполненных композитов**The composition of the wood-filled composites under study**

Древесная мука	Состав, мас. ч.	
	ПВД	Наполнитель
Ацетилированная (72 ч)	80	20
	70	30
	60	40
	50	50
	40	60
Необработанная	80	20
	70	30
	60	40
	50	50
	40	60

ИК-спектры контрольного и ацетилированного образцов (рис. 1) древесной муки березы снимали на отечественном ИК-Фурье-спектрометре ФСМ 1202 с помощью приставки многократного нарушенного полного внутреннего отражения в диапазоне измерений 650–4000 см⁻¹ при разрешении 4,0 см⁻¹.

В качестве полимерного связующего для получения композитов использовали полиэтилен высокого давления (ПВД) марки 10803-020 по ГОСТ 16337–2022.

Смешение древесной муки и ПВД осуществляли в камере смесителя Vrabender при температуре 145 °С и скорости вращения роторов 100 об./мин. В течение 5 мин после получения смешанной массы композит был пропущен через лабораторные вальцы с зазором 3 мм.

Далее с целью исследования эксплуатационных свойств древесно-наполненных композитов методом литья под давлением в инжекционной литьевой машине для пробоподготовки при температуре 145 °С с давлением впрыска 8 бар были получены стандартные образцы в виде полосок и определены предел прочности при растяжении по ГОСТ 11262–2017, истираемость по ГОСТ 11012–2017 и морозостойкость по ГОСТ 22346–2017.

Результаты исследования и их обсуждение

Для выявления влияния ацетилирования на структуру древесной муки были изучены ИК-спектры контрольного и ацетилированного образцов муки березы (рис. 1).

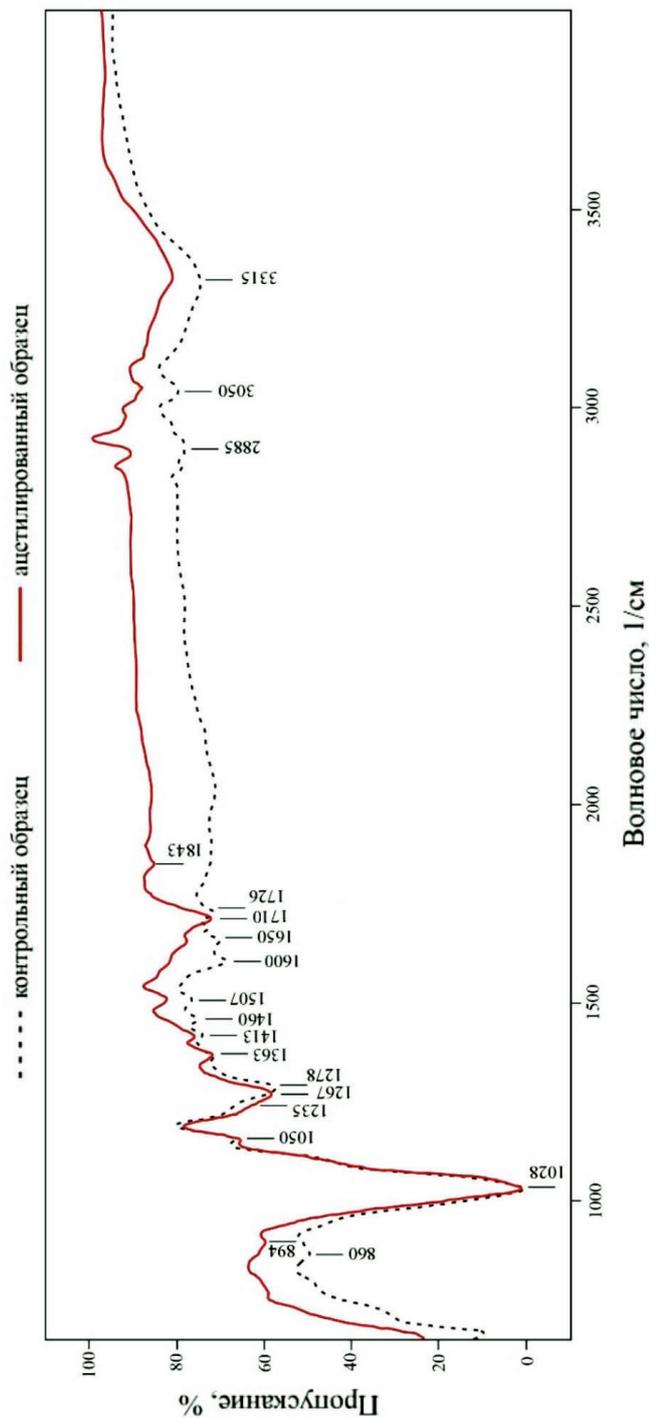
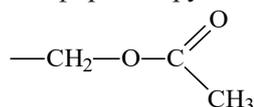


Рис. 1. ИК-спектры образцов древесной муки из березы
Fig. 1. The IR-spectra of birch wood flour samples

ИК-спектры контрольного и ацетилированного образцов содержат характеристические полосы поглощения, относящиеся к группам целлюлозы и лигнина листовых пород. Широкая полоса поглощения с максимумом в области 3315 см^{-1} маркирует валентные колебания гидроксильных групп фенолов, связанных межмолекулярными водородными связями. Деформационные колебания гидроксильных групп фенолов проявляются в области 1363 см^{-1} . В области $2885\text{--}3050\text{ см}^{-1}$ присутствуют валентные колебания связей С–Н в метильных и метиленовых группах.

Валентные колебания связей С=О в сложноэфирных группах, согласно литературным данным [1], проявляются в областях $1740\text{--}1710\text{ см}^{-1}$. В ИК-спектре контрольного образца этому диапазону соответствует полоса поглощения в области 1726 см^{-1} . Также в литературе отмечается [1], что валентные колебания группы С=О кетонов и альдегидов наблюдаемы в широком диапазоне частот: $1540\text{--}1870\text{ см}^{-1}$. Так, в ИК-спектре ацетилированного образца появляется широкая полоса поглощения с максимумом в области 1710 см^{-1} . Вероятно, в результате взаимодействия ледяной уксусной кислоты с $\text{--CH}_2\text{OH}$ -группами лигнина происходит образование сложноэфирных групп:



Это взаимодействие подтверждается появлением пика малой интенсивности в области 1843 см^{-1} в ИК-спектре ацетилированного образца и отсутствием пика в области 1460 см^{-1} , отвечающего за деформационные колебания связи С–Н в CH_2OH -группах мономерных звеньев лигнина [1]. Малая интенсивность пика 1843 см^{-1} , предположительно, связана с тем, что реакция по гидроксильным группам глюкозы с ледяной уксусной кислотой затруднена.

Обращает на себя внимание полоса поглощения контрольного образца в области 1600 см^{-1} , соответствующая валентным колебаниям связи С=О паразамещенных фенолов G-колец лигнинов с одной группой --OCH_3 . В данной области также могут проявляться валентные колебания связи С=О паразамещенных фенолов S-колец лигнинов с 2 группами --OCH_3 . Возможно, эта полоса поглощения перекрывается широкой полосой поглощения с максимумом 1710 см^{-1} .

Валентные колебания связи С=О паразамещенных фенолов H-колец лигнинов отмечены в области 1650 см^{-1} . Полоса поглощения в области 1507 см^{-1} соответствует скелетным колебаниям связей С–С ароматического гваяцильного кольца. Полосы поглощения в области $1267\text{--}1278\text{ см}^{-1}$ – скелетным колебаниям G-кольца. В этих же областях накладываются деформационные колебания связи С=О. Скелетные колебания связей С–С G-колец лигнинов и валентные колебания С–О в фенолах гваяцильных структурных единиц проявляются в области 1235 см^{-1} . Интенсивная полоса поглощения с максимумом 1028 см^{-1} соответствует деформационным плоскостным колебаниям связей С–Н в ароматическом кольце и несопряженным колебаниям связей С=О целлюлозы. Полоса поглощения в области 894 см^{-1} отражает деформационные внеплоскостные колебания связей С–Н в S- и G-ароматических кольцах. Полоса поглощения в области 860 см^{-1} – деформационные внеплоскостные колебания связей С–Н в положениях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца [1].

Для оценки влияния вида (ацелированный и обычный) и количества применяемого древесного наполнителя на эксплуатационные свойства (прочность на изгиб, морозостойкость, истираемость) композитов были изготовлены 10 групп образцов (5 групп – с ацелированной древесной мукой березы, 5 групп – с обычной древесной мукой березы). Погрешность измерений составила ± 1 %.

Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя на предел прочности образцов композитов при изгибе показано на рис. 2.

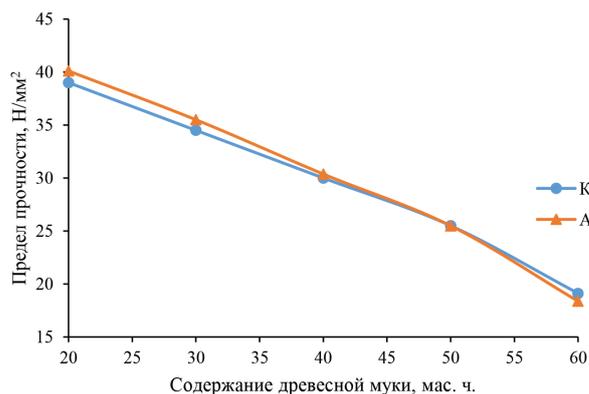


Рис. 2. Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя композитов на предел прочности при изгибе: К – контрольные образцы; А – ацелированные образцы (здесь и далее)
Fig. 2. The effect of concentration and pre-treatment of the filler of the composites on flexural strength limit: K – control samples; A – acetylated samples (hereinafter)

Анализ рис. 2 указывает на то, что увеличение количества древесного наполнителя в композите приводит к снижению предела прочности при изгибе, однако использование ацелированной древесной муки не оказывает существенного влияния на прочность по сравнению с композитами из обычной древесной муки. Наибольшая разница предела прочности при изгибе достигает 3 %. Это говорит об отсутствии негативного влияния на прочностные свойства материала использования ацелированной древесной муки в композите.

На рис. 3 представлены результаты определения морозостойкости образцов композитов, которая установлена по коэффициенту сохранения свойств после 20 циклов замораживания и оттаивания.

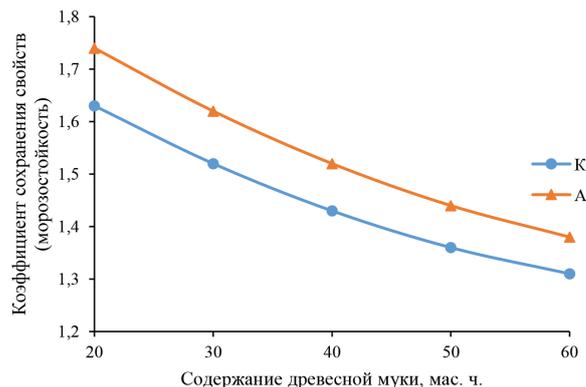


Рис. 3. Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя композитов на морозостойкость
Fig. 3. The effect of concentration and pre-treatment of the filler of the composites on frost-resistance

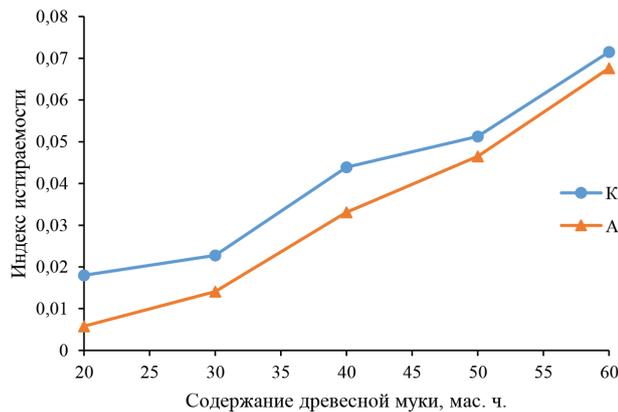
Как видно на рис. 3, увеличение доли древесного наполнителя в композите приводит к снижению коэффициента сохранения свойств. В то же время для композитов с ацелированным наполнителем морозостойкость выше, чем для контрольных образцов. Это можно объяснить тем, что в результате ацелирования древесного наполнителя происходит замещение свободных ОН-групп

ацетильными, что, в свою очередь, препятствует проникновению жидкости в структуру материала. Благодаря этому спустя 20 циклов попеременного замораживания и оттаивания композиты с ацетилированным древесным наполнителем показывают наилучшую стойкость к подобному воздействию.

На рис. 4 представлены результаты исследования индекса истираемости образцов композитов.

Рис. 4. Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя композитов на индекс истираемости

Fig. 4. The effect of concentration and pre-treatment of the filler of the composites on the abrasability index



Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что показатели для древесно-наполненного композита на основе ацетилированной древесной муки березы меньше в среднем в 1,5–2 раза применительно ко всем составам по сравнению с контрольными образцами. Это говорит об эффективности ацетилирования в качестве способа обработки древесного наполнителя.

Выводы

1. В результате ацетилирования ледяной уксусной кислотой древесной муки из березы основная структура лигнина и целлюлозы сохраняется, о чем свидетельствует появление пика малой интенсивности в области 1843 см^{-1} в ИК-спектре ацетилированного образца и отсутствие пика в области 1460 см^{-1} , отвечающего за деформационные колебания связи C–H в CH_2OH -группах мономерных звеньев лигнина. Однако происходит преобразование отдельных функциональных групп в результате взаимодействия ледяной уксусной кислоты с $-\text{CH}_2\text{OH}$ -группами мономерных звеньев лигнина с максимумом в области 1710 см^{-1} с образованием сложноэфирных групп.

2. Использование ацетилированного древесного наполнителя не оказывает негативного влияния на предел прочности при изгибе для всех исследованных составов (наибольшая разница в значениях предела прочности при изгибе достигает 3 %).

3. Изменение морозостойкости по коэффициенту сохранения свойств имело общую тенденцию для всех составов композита, при этом с увеличением концентрации наполнителя коэффициент уменьшался, однако композиты с ацетилированным древесным наполнителем показали лучший результат (5–6 % для всех составов) по сравнению с контрольными образцами. Это может быть связано с преобразованиями в химической структуре наполнителя, ввиду чего проникновение жидкости в глубь материала может быть затруднено.

4. Для композитов с ацелированным древесным наполнителем отмечен наилучший результат по индексу истираемости, однако наибольшие различия наблюдали для образцов с 20%-м содержанием древесного наполнителя (67 %), в то же время по мере увеличения доли древесного наполнителя в составе композиции разница значений между композитами с ацелированным и обычным древесным наполнителем уменьшалась и для образцов с 60%-м содержанием наполнителя составила 5,5 %. В целом снижение истираемости композитов может положительно сказаться на их долговечности, при этом универсальным составом с точки зрения эффективности может служить композит с 40 % древесного наполнителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пожидаев В.М., Ретивов В.М., Панарина Е.И., Сергеева Я.Э., Жданович О.А., Яцшишина Е.Б. Разработка метода идентификации породы древесины в археологических материалах методом ИК-спектроскопии // Журн. аналит. химии. 2019. Т. 74, № 12. С. 911–921.
Pozhidaev V.M., Retivov V.M., Panarina E.I., Sergeeva Ya.E., Zhdanovich O.A., Yatsishina E.B. Development of a Method for Identifying Wood Species in Archaeological Materials by IR Spectroscopy. *Zhurnal analiticheskoy khimii* = Journal of Analytical Chemistry, 2019, vol. 74, no. 12, pp. 911–921. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0044450219120107>
2. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Обзор современных исследований в области ацелирования древесины // Деревообраб. пром-сть. 2022. № 2. С. 106–114.
Prokopiev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Review of Modern Research in the Field of Wood Acetylation. *Derevoobrabativaushaya promishlennost'* = Woodworking Industry, 2022, no. 2, pp. 106–114. (In Russ.).
3. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Исследование свойств ацелированной древесины // Деревообраб. пром-сть. 2023. № 1. С. 86–91.
Prokopiev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Investigation of the Properties of Acetylated Wood. *Derevoobrabativaushaya promishlennost'* = Woodworking Industry, 2023, no. 1, pp. 86–91. (In Russ.).
4. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Исследование свойств древесно-полимерных композитов на основе ацелированного древесного наполнителя // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2(58). С. 99–106.
Prokopiev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Investigation of the Properties of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2023, no. 2(58), pp. 99–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-2-99-106>
5. Alfredsen G., Pilgård A. *Postia placenta* Decay of Acetic Anhydride Modified Wood – Effect of Leaching. *Wood Material Science & Engineering*, 2014, vol. 9, iss. 3, pp. 162–169. <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.887776>
6. Bongers F., Meijerink T., Lütke-meier B., Lankveld C., Alexander J., Miltz H., Lehringer C. Bonding of Acetylated Wood. *International Wood Products Journal*, 2016, vol. 7, iss. 2, pp. 102–106. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1161944>
7. Borysiak S., Pauksza D. Mechanical Properties of Lignocellulosic / Polypropylene Composites. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2008, vol. 484, no. 1, pp. 13/379 – 22/388. <https://doi.org/10.1080/15421400801901464>

8. Çetin N.S., Özmen N., Birinci E. Acetylation of Wood with Various Catalysts. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2011, vol. 31, iss. 2, pp.142–153. <https://doi.org/10.1080/02773813.2010.503981>
9. Eranna P.B., Pandey K.K., Nagarajappa G.B. A Note on the Effect of Microwave Heating on Iodine-Catalyzed Acetylation of Wood. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2016, vol. 36, iss. 3, pp. 205–210. <https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1112405>
10. Fodor F., Németh R., Lankveld C., Hofmann T. Effect of Acetylation on the Chemical Composition of Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in Relation with the Physical and Mechanical Properties. *Wood Material Science & Engineering*, 2018, vol. 13, iss. 5, pp. 271–278. <https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1316773>
11. Hamid N.H., Hale M. Decay Threshold of Acetylated Rattan against White and Brown Rot Fungi. *International Wood Products Journal*, 2012, vol. 3, iss. 2, pp. 96–106. <https://doi.org/10.1179/2042645311Y.0000000018>
12. Joeressen J., Baumann G., Spirk S., Krenke T., Schönauer T., Feist F. Chemical Resistance of Acetylated Radiata Pine Sliced Veneers. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, vol. 18, iss. 4, pp. 1467–1477. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2155565>
13. Khoaele K.K., Gbadeyan O.J., Chunilall V., Sithole B. A Review on Waste Wood Reinforced Polymer Composites and Their Processing for Construction Materials. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2023, vol. 16, iss. 1, pp. 104–116. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2214162>
14. Li J.-Z., Furuno T., Zhou W.-R., Ren Q., Han X.-Z., Zhao J.-P. Properties of Acetylated Wood Prepared at Low Temperature in the Presence of Catalysts. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2009, vol. 29, iss. 3, pp. 241–250. <https://doi.org/10.1080/02773810903009499>
15. Marsich L., Cozzarini L., Ferluga A., Solinas D., Schmid C. The Effect of Acetylation on Hybrid Poplar after Artificial Weathering. *International Wood Products Journal*, 2018, vol. 9, iss. 3, pp. 134–141. <https://doi.org/10.1080/20426445.2018.1513893>
16. Pizzi A., Zhou X., Navarrete P., Segovia C., Mansouri H.R., Placentia Pena M.I., Pichelin F. Enhancing Water Resistance of Welded Dowel Wood Joints by Acetylated Lignin. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2013, vol. 27, iss. 3, pp. 252–262. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.705512>
17. Popescu C.M., Hill C.A.S., Popescu M.C. Water Adsorption in Acetylated Birch Wood Evaluated through Near Infrared Spectroscopy. *International Wood Products Journal*, 2016, vol. 7, iss. 2, pp. 61–65. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1160538>
18. Rowell R.M. Acetylation of Natural Fibers to Improve Performance. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, vol. 418, iss. 1, pp. 153–164. <https://doi.org/10.1080/15421400490479244>
19. Rowell R.M. Chemical Modification of Wood: A Short Review. *Wood Material Science & Engineering*, 2006, vol. 1, iss. 1, pp. 29–33. <https://doi.org/10.1080/17480270600670923>
20. Rowell R.M., Ibach R.E., McSweeney J., Nilsson T. Understanding Decay Resistance, Dimensional Stability and Strength Changes in Heat-Treated and Acetylated Wood. *Wood Material Science & Engineering*, 2009, vol. 4, iss. 1–2, pp. 14–22. <https://doi.org/10.1080/17480270903261339>
21. Rozman H.D., Kumar R.N., Khalil H.P.S.A., Abusamah A., Abu R. Chemical Modification of Wood with Maleic Anhydride and Subsequent Copolymerization with Diallyl Phthalate. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 1997, vol. 17, iss. 4, pp. 419–433. <https://doi.org/10.1080/02773819708003142>

22. Sethy A.K., Vinden P., Torgovnikov G., Militz H., Mai C., Kloeser L., Przewloka S. Catalytic Acetylation of *Pinus radiata* (D. Don) with Limited Supply of Acetic Anhydride Using Conventional and Microwave Heating. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2012, vol. 32, iss. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1080/02773813.2011.573121>

23. Wålinder M., Brelid P.L., Segerholm K., Long C.J., Dickerson J.P. Wettability of Acetylated Southern Yellow Pine. *International Wood Products Journal*, 2013, vol. 4, iss. 3, pp. 197–203. <https://doi.org/10.1179/2042645313Y.0000000045>

24. Zelinka S.L., Passarini L. Corrosion of Metal Fasteners Embedded in Acetylated and Untreated Wood at Different Moisture Contents. *Wood Material Science & Engineering*, 2018, vol. 15, iss. 4, pp. 182–189. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1544171>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

Научная статья

УДК 678.046.52

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-159-176

Удельные энергетические затраты на измельчение древесины при подготовке композита для 3D-печати

Н.П. Мидуков¹✉, *д-р техн. наук*; ResearcherID: [H-2514-2019](https://orcid.org/0000-0002-6153-655X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6153-655X>

Н.В. Евдокимов¹, *ст. преподаватель*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8875-3493>

В.С. Куров¹, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

В.В. Коршунов², *техн. директор*; ResearcherID: [JHT-5558-2023](https://orcid.org/0009-0008-5259-5196),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5259-5196>

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; mnp83@mail.ru✉, nikoev@rambler.ru, vskurov18@mail.ru

²ООО «ДробТехМаш», ул. Центральная, д. 57, оф. 337, г. Уфа, Россия, 450024; korshunof@bk.ru

Поступила в редакцию 13.10.23 / Одобрена после рецензирования 16.01.24 / Принята к печати 19.01.24

Аннотация. Северо-Западный федеральный округ – регион России, богатый разнообразными породами древесины. Свойства древесины этого региона существенно отличаются от свойств древесины, выращенной в других странах или в восточной части России, что приводит к различиям в энергетических затратах на измельчение древесины. Целью данного исследования является оценка удельных энергетических затрат на измельчение древесины до состояния древесной муки, которая будет использоваться в качестве основы для древесно-полимерных композиционных расходных материалов в аддитивных технологиях. Древесную муку получали путем измельчения древесины в лабораторной дисковой мельнице, многократно уменьшая размер частиц. Анализ гранулометрического состава проводили для древесины бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны при 1, 3, 5 и 10 циклах измельчения. Размеры частиц определяли путем анализа изображений, полученных с помощью оптического микроскопа и обработанных в графической программе ImageJ. Удельные энергетические затраты на измельчение оценивали путем ежесекундной регистрации мощности ваттметром при многократной подаче древесной муки для известной производительности мельницы. При расчете удельного энергопотребления учитывали влажность каждой породы древесины, а также потери производительности, связанные с налипанием частиц древесины на рабочие поверхности диспергирующей гарнитуры и внутренней области корпуса дисковой мельницы. В результате исследования выявлена связь между удельными энергетическими затратами и размером частиц древесной муки, полученной из различных пород древесины. Регрессионный анализ кривых, соответствующих различным породам древесины, позволил получить экспоненциальные и степенные зависимости, которые не противоречат основополагающим теоретическим закономерностям измельчения твердых частиц. На основании этих результатов мука из древесины сосны была признана наиболее энергоэффективным вариантом. Установленные зависимости можно использовать для прогнозирования удельных энергозатрат на измельчение древесины бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны на дисковых мельницах.

© Мидуков Н.П., Евдокимов Н.В., Куров В.С., Коршунов В.В., 2024

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

Ключевые слова: древесная мука, древесно-полимерный композит, размол древесины, удельные энергетические затраты, распределение частиц по размерам

Благодарности: Исследование проведено в рамках темы «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалах». Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь, поддержан Комитетом по науке и высшей школе правительства Санкт-Петербурга. Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» за поддержку при проведении экспериментальных исследований гранулометрического состава древесных частиц. Также благодарны за высококвалифицированные консультации по морфологии мелких частиц, образующихся после измельчения.

Для цитирования: Мидуков Н.П., Евдокимов Н.В., Куров В.С., Коршунов В.В. Удельные энергетические затраты на измельчение древесины при подготовке композита для 3D-печати // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 159–176. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-159-176>

Original article

Specific Energy Costs of Grinding Wood when Preparing a Composite for 3D-Printing

*Nikolay P. Midukov*¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [H-2514-2019](https://orcid.org/0000-0002-6153-655X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6153-655X>

*Nikolay V. Evdokimov*¹, Senior Lecturer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8875-3493>

*Victor S. Kurov*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

*Valerii V. Korshunov*², Technical Director; ResearcherID: [JHT-5558-2023](https://orcid.org/0009-0008-5259-5196),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5259-5196>

¹Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; mnp83@mail.ru, nikoev@rambler.ru, vskurov18@mail.ru

²LLC “DrobTechMash”, ul. Tsentral’naya, 57, of. 337, Ufa, 450024, Russian Federation; korshunof@bk.ru

Received on October 13, 2023 / Approved after reviewing on January 16, 2024 / Accepted on January 19, 2024

Abstract. The Northwestern Federal District is a region of Russia rich in a variety of wood species. The properties of wood in this region differ significantly from the properties of wood grown in other countries or in the eastern part of Russia, which leads to differences in energy costs of grinding wood. The aim of this research has been to estimate the specific energy costs of grinding wood to the state of wood flour, which will be used as the basis for wood polymer composite consumables in additive technologies. Wood flour has been obtained by grinding wood in a laboratory disk mill, repeatedly reducing the particle size. The granulometric composition has been analyzed for beech, oak, larch, alder and pine wood at 1, 3, 5 and 10 grinding cycles. Particle sizes have been determined by analyzing images obtained using an optical microscope and processed in the ImageJ graphic program. The specific energy costs



of grinding have been estimated by recording the power with a wattmeter every second with repeated feeding of wood flour for the known mill productivity. When calculating the specific energy consumption, the moisture content of each wood species has been taken into account, as well as productivity losses associated with the adhesion of wood particles to the working surfaces of the dispersing set and the inner area of the disk mill body. The research has revealed a relationship between the specific energy costs and the particle size of wood flour obtained from various wood species. Regression analysis of curves corresponding to different wood species has made it possible to obtain exponential and power-law dependencies that do not contradict the fundamental theoretical laws of grinding solid particles. Based on these results, pine wood flour has been recognized as the most energy-efficient option. The established dependencies can be used to predict the specific energy consumption for grinding beech, oak, larch, alder and pine wood in disk mills.

Keywords: wood flour, wood-polymer composite, wood grinding, specific energy costs, particle size distribution

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the topic “Development of Methods for Evaluating and Analyzing the Heterogeneity of Interfiber Bonds in a 2D/3D Heterogeneous Medium of Cellulose Composite Materials.” A joint scientific and scientific-technical project carried out by educational and scientific organizations located in the territories of St. Petersburg and the Republic of Belarus was supported by the Committee for Science and Higher Education of the Government of St. Petersburg. The authors express their gratitude to the Center for Collective Use of the National Research Center “Kurchatov Institute” – the Central Research Institute of Structural Materials “Prometey” for support in conducting experimental investigations of the granulometric composition of wood particles. We are also grateful for highly qualified consultations on the morphology of small particles formed after grinding.

For citation: Midukov N.P., Evdokimov N.V., Kurov V.S., Korshunov V.V. Specific Energy Costs of Grinding Wood when Preparing a Composite for 3D-Printing. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 159–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-159-176>

Введение

Древесина является природным материалом, в состав которого входят целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, экстрактивные вещества. В зависимости от породы, возраста дерева, времени года и места произрастания компонентный состав может быть разным. Плотность, влажность и др. свойства древесины влияют на ее прочность и энергопотребление оборудования в процессе измельчения древесины.

Мелкие опилки и древесная пыль, помимо устоявшихся областей применения, таких как совместное сжигание с углем и производство биотоплива, могут быть использованы в древесно-пластиковых композитах, для получения которых измельчение древесины в порошок или тонкое измельчение древесины – важный этап предварительной обработки [2, 11, 15]. Из-за прочности древесной матрицы измельчение является энергоемким процессом, и для повышения экономичности может потребоваться предварительная термическая или химическая обработка [19].

Несмотря на то, что плотность материала клетки древесины любой породы равна 1530 кг/м³, каждый из них имеет уникальную структуру. Внутри одной породы могут наблюдаться изменения клеточной структуры (длины воло-

кон) в зависимости от условий произрастания дерева [5–7]. Таким образом, на энергетические затраты в процессе размолла влияют исходные размеры и форма частиц древесины, порода, место произрастания, влажность материала, а также используемое размалывающее оборудование.

Американские ученые представили результаты размолла древесины белого кедра, сосны, пихты и красного клена, растущих в Северной Америке [20, 21]. Показаны расчеты по снижению энергетических затрат на транспортировку древесины за счет измельчения и прессования. Одним из основных методов исследования древесной муки была сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), позволившая выявить причины повышения насыпной плотности (с 190...220 до 700...750 кг/м³) – особенности микроструктуры частиц кедра, сосны, пихты, клена (ширина частиц, жесткость, количество мелких, поломанных частиц, слоистость, схожесть с трубчатой структурой, наличие пучков волокон и т. д.).

СЭМ или оптическую микроскопию часто используют для оценки формы частиц древесной муки. Эти методы в большей степени объясняют влияние формы частиц на насыпную плотность, свойства композита на основе частиц древесины [10, 18]. Оптическая микроскопия древесной муки с применением графических программ, как правило, выступает в качестве доступного метода, в отличие от дорогой СЭМ. Однако с помощью последней, обладающей большим разрешением, можно детальнее оценить геометрию частиц. Работы по исследованию древесной муки чаще всего посвящены конкретным породам древесины [8, 12, 23].

В большинстве случаев удельные энергозатраты на размол древесины находятся в экспоненциальной зависимости от размера получаемых частиц. Измельчение твердых частиц древесины в молотковых дробилках можно описать законом Риттингена [14, 25]. По такому же закону действуют измельчители строительных смесей [14]. В работе [14] предложена мельница, которая эффективно работала только до определенной степени помола древесины. Тенденция снижения эффективности измельчения характерна для большинства размалывающих машин. Однако конструкция мельницы во многом определяет успешность процесса на разных стадиях, которых может быть несколько.

В статье [25] представлены результаты оценки удельных затрат энергии на размол древесины сосны и пихты, растущих в Северной Америке, при 2-стадийном измельчении: сначала в мельнице ударного типа до размеров частиц 316...1618 мкм, а затем в молотковой дробилке до размеров 35...250 мкм. Авторы установили, что затраты энергии резко возрастают при размолле до мелкой фракции. Несмотря на типичный экспоненциальный характер изменения энергии при измельчении древесины, количественный показатель в большей степени будет определяться размалывающим оборудованием.

Известны способы размолла древесины в ножевых, дисковых, вибрационных, истирающих и сдавливающих аппаратах. Ножевые размалывающие машины нашли широкое применение при измельчении древесины до крупных частиц, например при производстве щепы либо при измельчении веток, стружек, реек. В таких аппаратах осуществляется грубое предварительное

измельчение. Для производства древесной муки распространены мельницы ударного типа [25].

Дисковые мельницы часто применяют при мокром размоле древесины, т. к. при сухом за счет сил трения большое количество энергии переходит в тепловую, что приводит к возгоранию частиц древесины. Однако этот способ размола показал очень высокую эффективность.

Теория процесса размола целлюлозных материалов в дисковых мельницах была создана А.А. Гаузе, В.Н. Гончаровым. В их работе подробно оценен каждый из факторов (механическое, ударное, пульсационное, кавитационное воздействия, воздействия жидкостного трения), определяющих в целом энергетическую составляющую процесса размола. Представлены подробные методики расчета размалывающих машин для различных видов волокнистых суспензий [3]. В работах Ю.Д. Алашкевича с соавт. мокрый размол показан как способ измельчения древесины с последующим удалением части лигнина [1, 16].

Измельчители типа роллов встречаются как при мокром, так и при сухом способах размола древесины (щепы и опилок). Наиболее мелкая фракция частиц древесины может быть получена в шаровых мельницах, которые подразделяются на вращающиеся с перемешиванием и вибрационные [23]. Однако самой распространенной мельницей для получения древесной муки в больших объемах является молотковая дробилка.

Таким образом, можно отметить, что исследований в области влияния удельных энергетических затрат при размолу на размеры частиц древесины, а также данных о диапазоне размеров частиц, при котором затраты энергии резко повышаются с небольшим уменьшением размеров частиц древесины Северо-Западного региона нашей страны, нет, что стало целью данной работы. Для достижения цели необходимо решить задачи, связанные с подготовкой для отечественных предприятий доступной и недорогой методики оценки размеров частиц при размолу, затрат мощности при размолу различных пород древесины, определения зависимостей удельных затрат энергии от размеров частиц древесины.

Важно также отметить, что размеры частиц древесины оказывают влияние на свойства полимерных композитов на основе древесной муки [4, 9, 13, 17, 22]. Значимость подготовки древесины в небольших объемах для аддитивных технологий заключается в соотношении энергетических затрат на измельчение с другими затратами, такими как транспортные и трудовые.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования измельчали древесину бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны, взятых в Северо-Западном регионе России в осеннее время. Контроль влажности осуществляли с помощью термогравиметрического инфракрасного влагомера Sartorius M-45 (Германия). Равновесная влажность (древесина более 2 недель находилась в закрытой лаборатории при температуре 20 °С и относительной влажности 75...80 %) бука составила 5,8 %; дуба – 5,8 %; лиственницы – 10,0 %; ольхи – 6,7 %; сосны – 8,9 %. Размол древесины выполняли в лабораторной дисковой мельнице Stromberg HXUR 225A3

(Швеция) при одинаковом режиме работы для всех видов древесины. Характеристики мельницы: мощность – 2,2 кВт; частота вращения – 940 об./мин; номинальный ток – 5,5 А; отношение входного тока к номинальному – 4,8; отношение пускового крутящего момента к номинальному – 2,4; отношение максимального крутящего момента к номинальному – 2,4; коэффициент мощности двигателя – 0,76; коэффициент полезного действия – 80 %; момент инерции ротора – 0,0085 кг·м². Частицы древесины измельчали в режиме работы мельницы с минимальным зазором [24].

Предварительно были определены энергозатраты лабораторной мельницы, через которую многократно пропускали по 50 г частиц древесины. Мельница функционировала при минимально возможном зазоре между дисками ротора и статора.

Оценку мощности при размоле древесины различных пород (бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны) производили с помощью ваттметра Watt meter АСМ-8003, который был подсоединен к 3-фазному электродвигателю переменного тока (380 Вт) – приводу лабораторной дисковой мельницы.

После размолы оценивали распределение частиц по размерам с помощью оптической микроскопии и программы ImageJ. Для получения изображения древесную муку распределяли на предметном стекле оптического микроскопа. Четыре смежных микроснимка объединяли, при этом позиционирование осуществляли по тарировочной окружности диаметром 0,15 мм (на рис. 1 отмечена темным кружком).

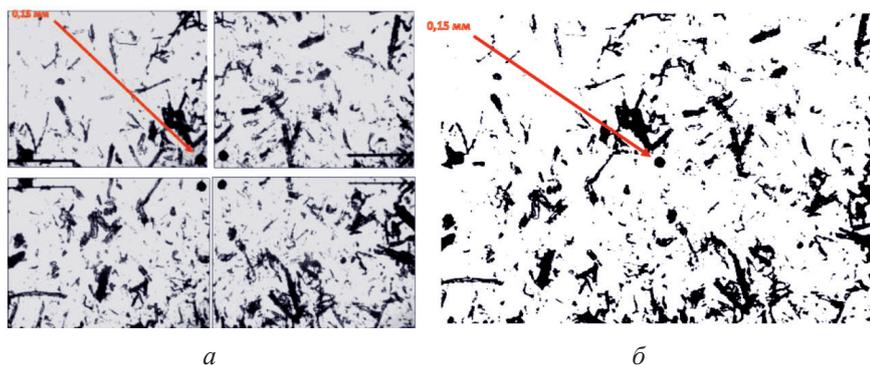


Рис. 1. Микроснимки частиц древесины: *a* – отдельных участков; *б* – объединенный

Fig. 1. The micrographs of wood particles: *a* – individual sections; *б* – combined micrograph

Более широкий охват области, состоящей из 4 снимков, позволил проанализировать больше частиц, тем самым повысив точность измерения.

Изображение, показанное на рис. 1, *б*, для ускорения дальнейшей обработки было преобразовано в программе ImageJ в 8-битный формат с помощью набора команд Image → Type → 8-bit (Изображение → Тип → 8 бит) (рис. 2, *a*). Затем был установлен масштаб путем нанесения размерной линии длиной 0,15 мм (рис. 2, *б*). После установки масштаба программа точно позволяет рассчитать геометрию черных областей на изображении, соответствующих частицам древесной муки.

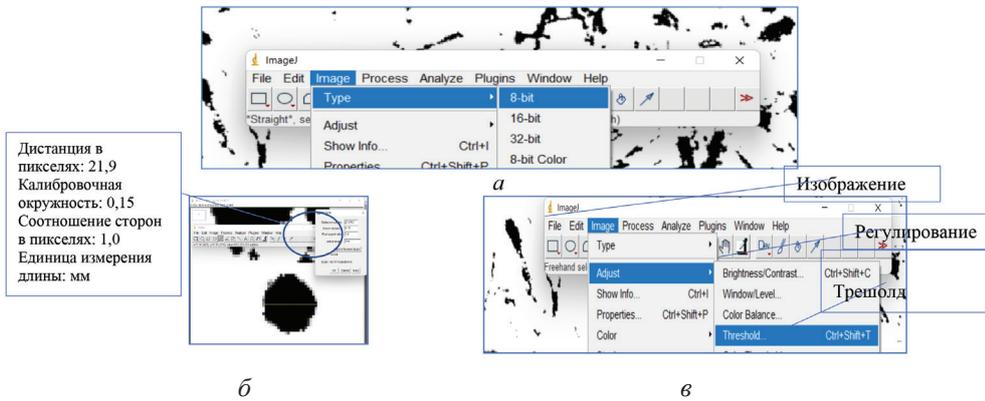


Рис. 2. Загрузка и первичная обработка изображения микроснимков в ImageJ: *a* – перевод изображения в 8-битный формат; *б* – установка масштаба относительно калибровочной окружности диаметром 0,15 мм; *в* – автоматическая графическая обработка изображения

Fig. 2. The loading and primary processing of micrograph images in ImageJ: *a* – converting an image into an 8-bit format; *б* – setting the scale relative to the calibration circle with a diameter of 0.15 mm; *в* – automatic graphic image processing

Следующим этапом подготовки микроснимков (рис. 3, *a*) является автоматическая обработка с помощью команд Image → Adjust → Threshold (Изображение → Регулирование → Трешолд).

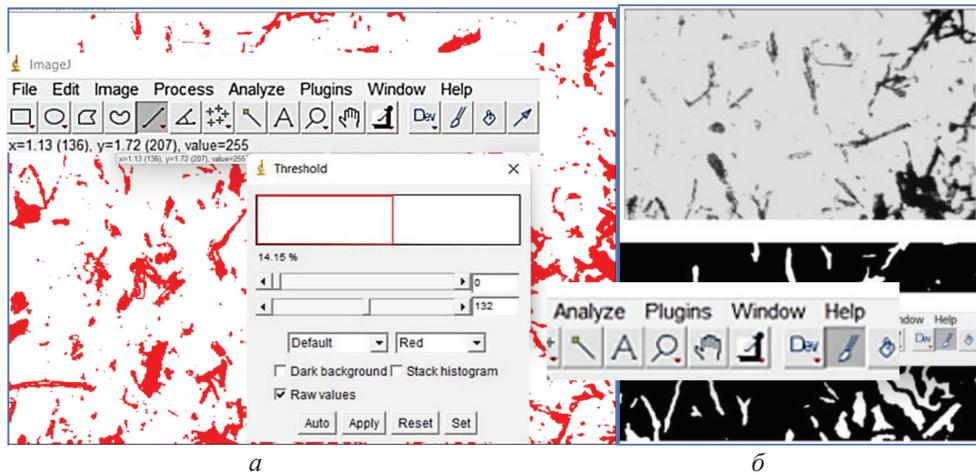


Рис. 3. Подготовка микроснимков к анализу: *a* – результат автоматической обработки командой Threshold; *б* – использование графических фильтров

Fig. 3. Preparing micrographs for analysis: *a* – result of automatic processing with the “Threshold” command; *б* – using graphic filters

В некоторых случаях необходимо графическое фильтрование объектов (рис. 3, *б*). Важно отметить, что частицы древесины являются 3-мерными и фокусировка микроскопа может исказить их размеры. Проверка геометрии частиц древесины включает небольшую корректировку фокуса и ручное уточнение графического изображения (рис. 3, *б*). Программа ImageJ предоставляет

необходимые инструменты для этой цели. Графический фильтр использовали в одинаковом режиме для обработки каждого изображения.

После предварительной подготовки образцы были выделены (рис. 4, *a*) посредством команды Edit → Selection → Create Selection (Корректировка → Выборка → Создать выборку).

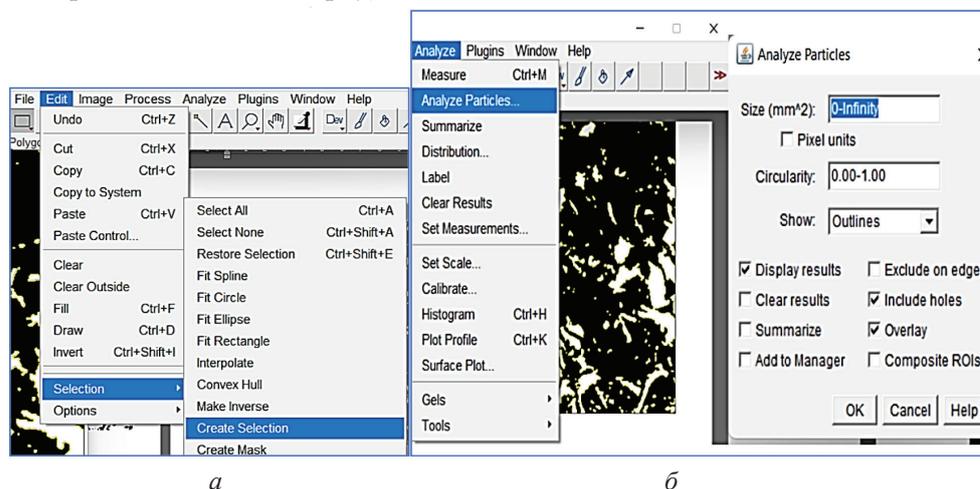


Рис. 4. Выделение областей, соответствующих частицам древесины (*a*), и дальнейший анализ частиц (*б*)

Fig. 4. The identification of areas corresponding to wood particles (*a*) and further particle analysis (*б*)

Затем производили расчет геометрических параметров частиц, выделенных с помощью последовательности команд Analyze → Analyze Particles (Анализ → Анализ частиц). В открывшемся диалоговом окне (рис. 4, *б*) можно выбрать диапазон размеров частиц, которые следует учитывать. В данном случае выделены все частицы (рис. 5).

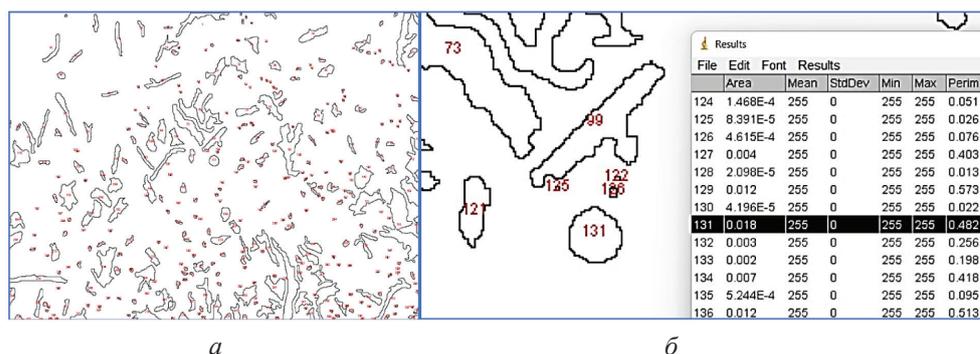


Рис. 5. Выделение и нумерация исследуемых областей в программе ImageJ: выделенные объекты (*a*) и данные их расчета (*б*)

Fig. 5. The selection and numbering of the study areas in the ImageJ program: selected objects (*a*) and their calculation data (*б*)

Программа ImageJ позволяет рассчитать размеры частиц. Например, на рис. 5, *б* отображены результаты определения площади (Area) и периметра (Perim). Всего программа зафиксировала и проанализировала 358 объектов.

Достоверность расчета размеров можно проверить по 131-му объекту, который соответствует калибровочной окружности диаметром 0,15 мм, площадь каждого объекта определима по формуле $S = \pi d^2/4 = 0,018 \text{ мм}^2$ (d – диаметр, мм), что совпадает с рассчитанным программой ImageJ.

Следующим этапом является статистическая обработка данных, а именно построение диаграммы распределения частиц по размерам. Программа ImageJ не имеет функции построения графиков распределения, но может передать данные расчета площади и периметра в Excel. Для этого был установлен специальный плагин Excel Writer. После установки получен доступ к команде Excel ToolBar в программном меню ImageJ.

Как правило, современные анализаторы частиц в качестве результата показывают не площадь и не периметр, а размер частицы, который представляет собой эквивалентный диаметр. Это понятие широко используется при теоретическом описании и расчете процессов, в которых частицы не имеют шарообразную форму. Распределение частиц по размерам строится по данным их эквивалентного диаметра, рассчитанным в Excel.

Таким образом, с помощью ImageJ определены размеры частиц древесины после размола в мельнице, для чего использована оптическая микроскопия. Всего было проанализировано 7158 частиц, разделенных на классы по природе древесины: бук (Б), дуб (Д), лиственница (Л), ольха (О), сосна (С); и подклассы по числу циклов размола: 0 – без размола; 1, 3, 5, 10 циклов размола в дисковой мельнице. На рис. 6 представлены отдельные области (15×15 мм), малая часть от всего анализируемого изображения. В среднем площадь анализируемой области составляла 50×50 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Визуальный анализ рис. 6 показывает, что с увеличением числа проходов через мельницу размеры частиц уменьшаются в разной степени для различных видов древесины. Причем после 1 цикла размола происходит максимальное снижение размеров частиц. Кроме того, видно, что после размола появляется большое количество частиц с явными признаками изломов, трещин, каверн. Однако для более детального исследования необходимо проанализировать размеры каждой частицы, после чего получить кривые их дифференциального распределения по размерам. С помощью этих кривых можно оценить качество размола на каждой стадии.

Существует рекомендация по выбору параметра дифференциальной кривой распределения, по которой ведется сравнение. До известной степени выбор наилучшей меры центральной тенденции зависит от шкалы измерений: если есть данные, извлеченные из номинальной шкалы, то единственно подходящей может быть мода, т. е. пик (вершина кривой) размеров частиц. Если данные взяты из ранговой (порядковой) шкалы, то искомыми мерами будут и мода, и медиана. Когда данные метрические, интервальные или измерены по абсолютной шкале, то применимы все 3 меры. Обычно при анализе метрических данных на практике используют более 1 меры центральной тенденции. Чаще всего это среднее и медиана [24]. В данном случае в качестве оценки и сравнения кривых распределения частиц по размеру была использована медиана дифференциальной кривой.

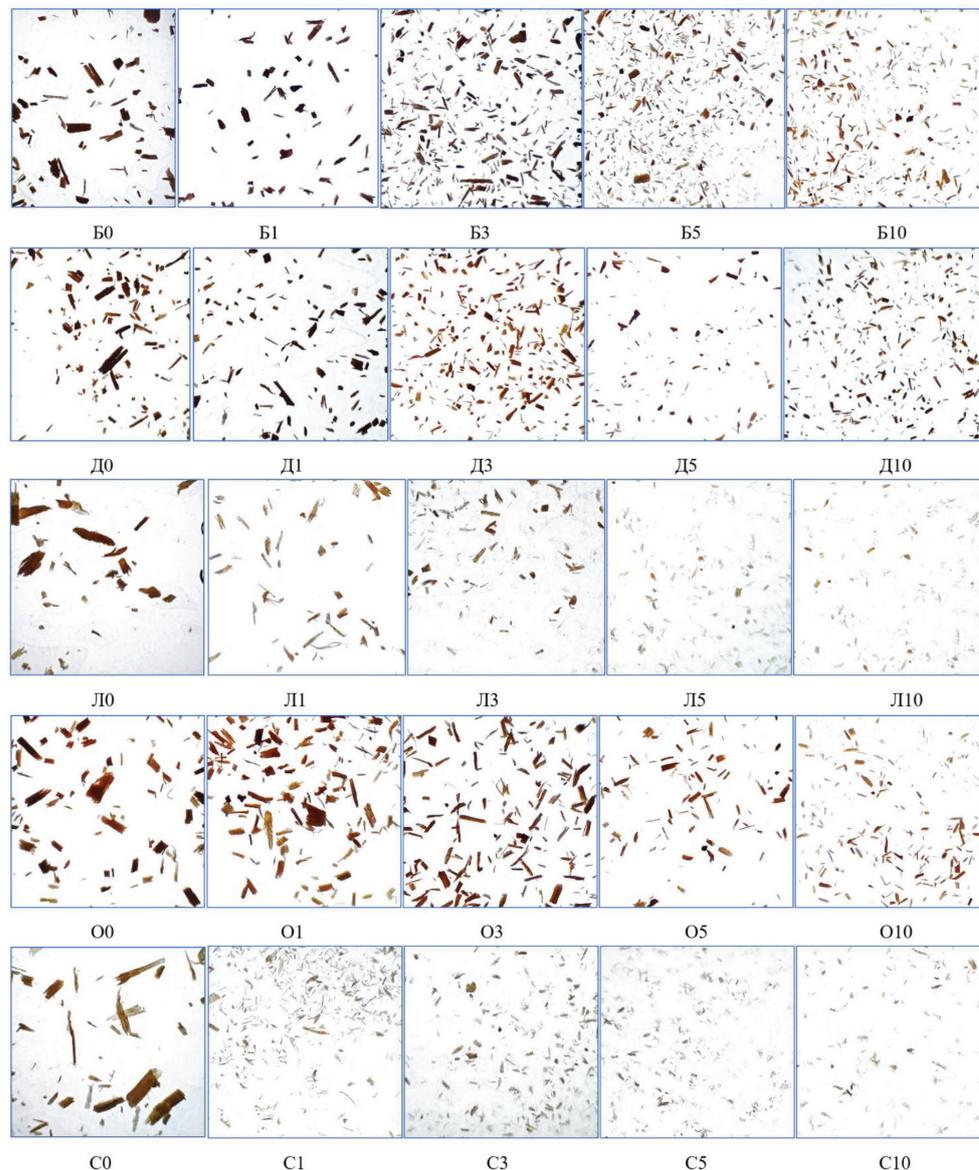


Рис. 6. Фрагменты изображений частиц древесины бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны, полученные оптическим микроскопом и цифровой камерой после 0, 1, 3, 5, 10 проходов древесины через мельницу

Fig. 6. The fragments of images of beech, oak, larch, alder and pine wood particles obtained with an optical microscope and a digital camera after 0, 1, 3, 5 and 10 passes of wood through the mill

Интервал распределения частиц, как правило, оценивают по формуле Г.А. Стерджеса [24], по ней интервал составил 300 мкм. В нашем случае необходимыми и максимально возможными являются интервалы в 100 мкм. На рис. 7 представлены кривые распределения частиц по размерам для разных пород древесины. Кривые дифференциального распределения были сгруппированы по породам древесины. Каждый график включает в себя 5 дифференциальных кривых, которые соответствуют числу циклов размолла древесины в дисковой мельнице.

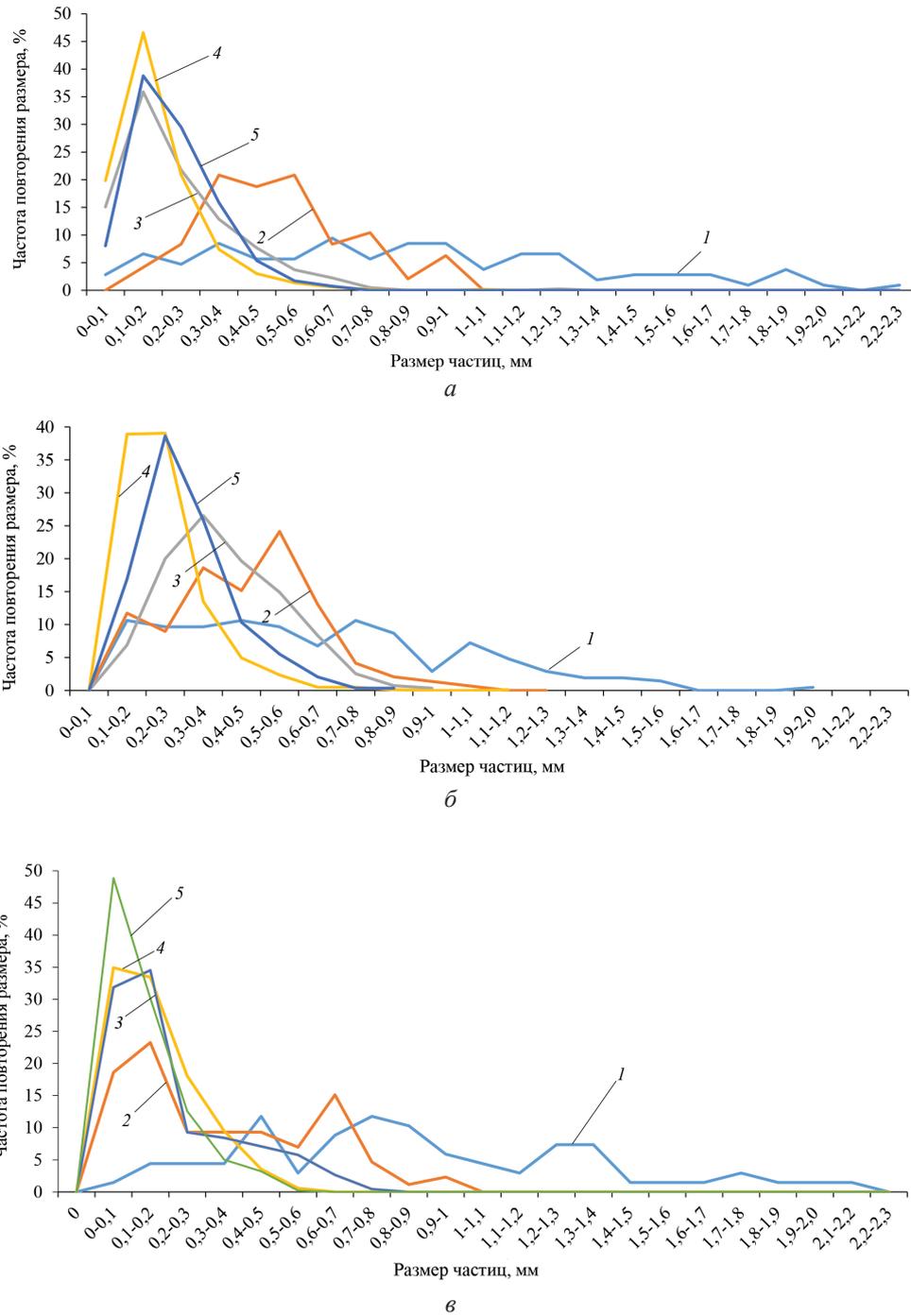


Рис. 7. Влияние продолжительности размола в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц: а, б, в – древесина бука, дуба, лиственницы соответственно; 1, 2, 3, 4, 5 – кривые распределения после 0, 1, 3, 5, 10 проходов через мельницу соответственно

Fig. 7. The effect of grinding duration in a laboratory disk mill on particle sizes: а, б, в – beech, oak and larch wood, respectively; 1, 2, 3, 4, 5 – distribution curves after 0, 1, 3, 5, 10 passes through the mill, respectively

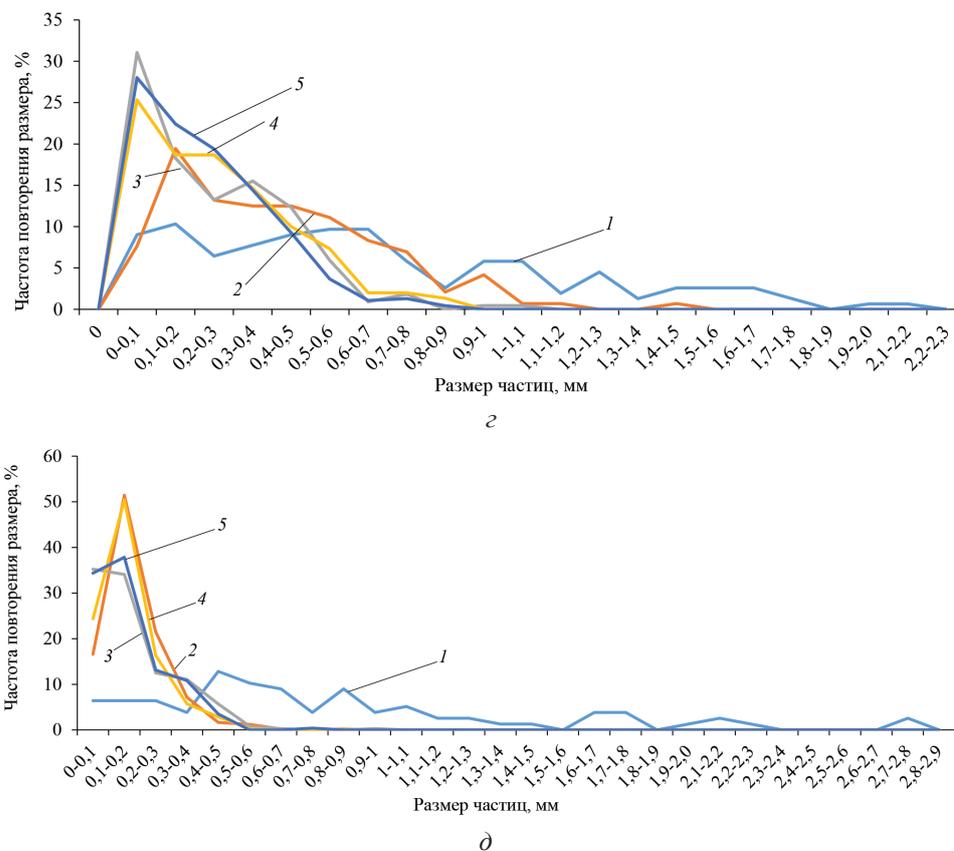


Рис. 7. Влияние продолжительности размола в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц (окончание): *а, б* – древесина ольхи и сосны соответственно; *1, 2, 3, 4, 5* – кривые распределения после 0, 1, 3, 5, 10 проходов через мельницу соответственно

Fig. 7. The effect of grinding duration in a laboratory disk mill on particle sizes: *а, б* – alder and pine wood, respectively; *1, 2, 3, 4, 5* – distribution curves after 0, 1, 3, 5, 10 passes through the mill, respectively

На рис. 7, *а* представлены дифференциальные кривые распределения частиц древесины бука. Кривая *1* соответствует нормальному распределению частиц древесины до размола, среднее значение при этом находится на уровне 851 мкм, наибольший пик соответствует 780 мкм, а медиана составляет 800 мкм. Всего было исследовано 106 частиц. После 1 размола произошло снижение среднего значения и медианы (493 мкм). Характер распределения остался нормальным, но наблюдалась асимметрия влево. Об этом свидетельствует большее значение моды (в пике распределения), чем медианы. Дальнейший размол древесины бука также приводил к снижению размеров частиц. После 10-го прогона, в котором была исследована 661 частица, медиана была на уровне 161 мкм, а пик пришелся на 126 мкм. Следует отметить, что при анализе влияния циклов размола на размер частиц установлено резкое снижение медианы после 1-го размола, а в последующем размол с каждым циклом незначительно уменьшал размеры частиц.

На рис. 7, *б* представлена группа дифференциальных кривых размеров частиц древесины дуба. По аналогии с буком, с каждым циклом размола древесины снижались размеры частиц. Предварительно перед размолом было ис-

следовано 207 частиц. Средний размер частиц (по медиане дифференциальной кривой) до размола находился на уровне 505 мкм, а характер дифференциальной кривой был нормальный. С дальнейшим увеличением числа циклов размола также наблюдалось снижение размеров частиц, и после 10 циклов медиана распределения составила 127 мкм, при этом мода, маркирующая пик распределения, была ниже, что говорит об асимметрии дифференциальной кривой влево. Количество проанализированных частиц с увеличением числа циклов размола повышалось до 808. В целом можно отметить аналогию в изменении частиц в зависимости от числа циклов размола древесины бука. Как известно, древесина бука и дуба обладает примерно одинаковой плотностью; вероятно, поэтому особенности их размола схожи, о чем свидетельствует совпадающая динамика изменения частиц, представленная в виде дифференциальных кривых распределения.

Древесина лиственницы существенно отличается от бука и дуба плотностью, которая составляет примерно 370 кг/м³. В результате характер распределения частиц по размерам после каждого цикла размола другой по сравнению с характером распределения частиц древесины бука и дуба. Каждая кривая цикла размола была умеренно асимметричной и не подчинялась нормальному закону. Кроме того, дифференциальные кривые после 1-го цикла размола и без размола имели ярко выраженную бимодальную составляющую, обладая 2 пиками. Сравнение дифференциальных кривых также проводили по медиане, которая в начальном варианте находилась на уровне 781 мкм, а после 10-го цикла – на уровне 106 мкм. После 3-го цикла медиана составила 135 мкм, что соответствует размеру частиц древесины, подходящему для составления композиций. Во всех 3 случаях, соответствующих распределению частиц после 3, 5, 10 циклов размола, мода была ниже медианы, что говорит об асимметрии дифференциальной кривой распределения влево. В отличие от дуба и бука лиственница размалывалась гораздо быстрее, следовательно, можно утверждать о меньших затратах энергии на ее размол по сравнению с дубом и буком.

На рис. 7, з показаны кривые распределения частиц древесины ольхи по размерам. Размер частиц, согласно медиане, составил 547 мкм. Перед размолем было проанализировано 155 частиц. Их первоначальное распределение в интервале 100 мкм представлено в виде кривой, отличной от нормального распределения. По аналогии с буком и дубом у ольхи плавно снижалось среднее значение (по медиане) размера частиц с каждым циклом размола. В итоге после 10-го цикла был получен размер частиц 199 мкм, соответствующий медиане кривой 5 на рис. 7, з. По аналогии с лиственницей, ни одна из кривых для ольхи не попадала под закон нормального распределения, за исключением кривой после 1-го цикла размола. Остальные кривые либо не соответствовали нормали, либо имели умеренно асимметричный характер распределения. В целом можно сказать, что параметры древесины ольхи при размолке занимают промежуточное положение между параметрами для бука и дуба или лиственницы.

Характер распределения частиц древесины сосны (рис. 7, д) заметно отличался от распределения частиц других видов древесины. На 1-м этапе было исследовано 78 частиц, при этом распределение кривой не соответствовало нормальному и медиана находилась в пределах 600 мкм, а пик повторяемости размеров составил 115 мкм. Среднее арифметическое было 810 мкм. Такой

разброс в параметрах распределения частиц означает, что сосна имеет довольно хрупкую структуру и быстро разрушается. Уже после 1-го цикла размола медиана снизилась до 146 мкм – вывод сделан на основе исследования 488 частиц, – а мода сохранилась на прежнем уровне – 112 мкм. Дальнейший размол (до 10-го цикла) практически не дал результатов – медиана, мода и среднее значение остались почти на том же уровне. Характер распределения частиц был умеренно асимметричным во всех случаях. Вероятно, дальнейшая обработка в мельнице подобного типа была нецелесообразна, т. к. размер частиц древесины изменился незначительно. Однако цель размола заключалась в получении частиц древесины менее 200 мкм, что было достигнуто уже после 1-го цикла размола, поэтому сосна является наиболее предпочтительным видом древесины с точки зрения затрат энергии на размол.

Представленные графики распределения частиц по размерам позволяют характеризовать особенность размола древесины различных пород. Однако при размоле древесины необходимо оперировать удельными затратами энергии. Эффективность размола определяется зависимостью между удельными затратами энергии и размерами частиц древесины. Сравнив их между собой, можно прийти к окончательному выводу о целесообразности использования древесины сосны в качестве сырья для получения композита. Для этого были проведены экспериментальные исследования, которые зафиксировали показания мощности электродвигателя с помощью ваттметра. Размол древесины осуществляли подачей частиц в дисковую мельницу порциями по 25 г с многократным повторением. Всего было выполнено более 150 замеров мощности, по которым определяли энергетические затраты для каждого вида древесины (рис. 8).

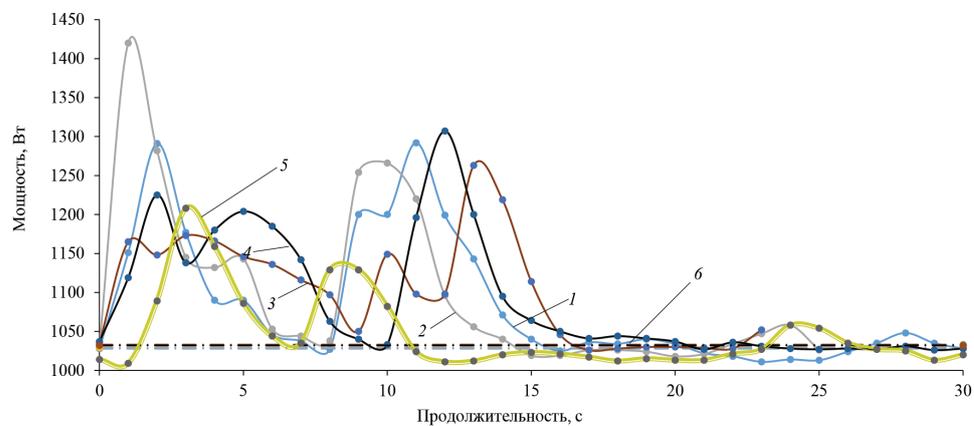


Рис. 8. Оценка мощности дисковой мельницы при размоле различных пород древесины: 1, 2, 3, 4, 5 – размол бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны соответственно; 6 – холостой ход

Fig. 8. The evaluation of the power of a disk mill when grinding various types of wood: 1, 2, 3, 4, 5 – grinding beech, oak, larch, alder and pine wood, respectively; 6 – idle

Из рис. 8 видно, что наибольшая мощность требуется для размола древесины дуба и бука (1400 Вт); наименьшая – сосны (пик мощности – 1208 Вт). Мощность холостого хода при этом составила 1030 Вт. При расчете удельных затрат энергии было взято среднее значение 2 пиков мощности, соответствующих продолжительности размола 15 с каждый (рис. 7).

Также для оценки удельных энергетических затрат была определена производительность мельницы, которая рассчитана исходя из массы размолотой древесины в единицу времени. Согласно расчетам, производительность мельницы составила приблизительно 9 кг/ч. После этого определяли удельные затраты энергии для исследуемых пород древесины. Общие удельные затраты энергии умножали на число циклов. В результате построены экспериментальные зависимости удельных затрат энергии от размеров частиц, определенных ранее по кривым распределения (за размер взята медиана распределения).

Из рис. 9 видно, что сосна после 1-го цикла, который соответствует удельным затратам энергии 0,118 кВт·ч/кг, размалывается до размеров частиц 131 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров частиц до 120 мкм связано с 10-кратным увеличением удельных затрат энергии. Таким образом, древесина сосны может быть размолота за 1 цикл работы мельницы при удельных затратах энергии 0,118 кВт·ч/кг; для лиственницы размол до 135 мкм приходится на уровень энергетических затрат 0,378 кВт·ч/кг. Остальные виды древесины размалываются до необходимого диапазона (до 200 мкм) при расходе энергии 1,26 кВт·ч/кг, что соответствует 10 циклам размолы в дисковой мельнице. Таким образом, график показывает, что наиболее предпочтительной является древесина сосны, т. к. для ее размолы требуется гораздо меньше энергии, чем для остальных пород древесины.

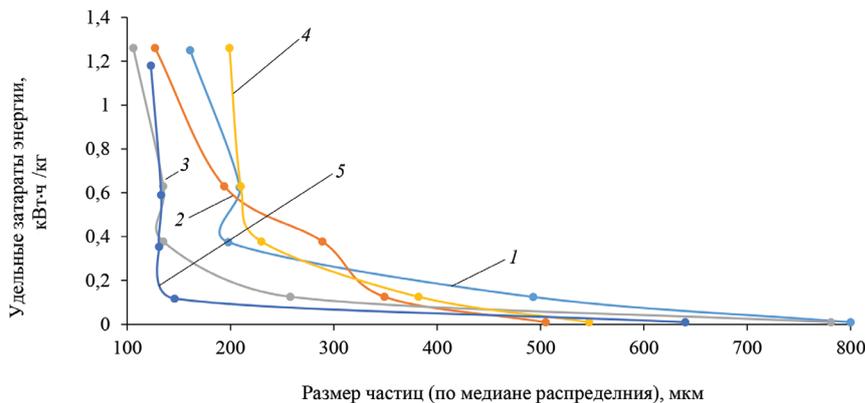


Рис. 9. Зависимость удельных затрат энергии на размол различных пород древесины от размеров частиц: 1 – бук; 2 – дуб; 3 – лиственница; 4 – ольха; 5 – сосна

Fig. 9. The dependence of the specific energy consumption for grinding various types of wood on the particle size: 1 – beech; 2 – oak; 3 – larch; 4 – alder; 5 – pine

Регрессионный анализ зависимостей удельных затрат энергии (E , кВт·ч/кг) от размеров частиц древесины (δ , мкм), представленных на рис. 9, дает возможность определить, к какому виду относится уравнение. Коэффициенты в уравнениях определены для конкретного случая лабораторного размолы в дисковой мельнице для частиц древесины, влажность которых находится в равновесии в определенном помещении. Однако представленные ниже уравнения для различных древесных пород при размолы были отнесены к следующим видам зависимостей:

для древесины бука $E = (69 \cdot 10^4)^{\delta-2.6}$ – наиболее близка степенная функция;

для дуба $E = e^{2.13-0.01\delta}$ – экспоненциальная зависимость;

для лиственницы $E = (47 \cdot 10^3)^{\delta-2,3}$ и ольхи $E = (35,9 \cdot 10^8)^{\delta-4,2}$ – степенная зависимость.

В отличие от бука, дуба, лиственницы и ольхи, уравнение для сосны пришлось разбить на диапазоны до 150 мкм и выше. В диапазоне до 150 мкм была предложена экспоненциальная зависимость, которая подчиняется уравнению

$$E = e^{12,1-0,1\delta}.$$

В диапазоне выше 150 мкм зависимость удельных затрат энергии от размеров частиц сосны при размоле соответствовала степенной зависимости, которая определяется уравнением

$$E = 236\delta^{-1,5}.$$

Индексы корреляции и детерминации были близки к 1 для всех представленных зависимостей, также были установлены фактические критерии Фишера, которые существенно превышали табличные, поэтому предложенные зависимости можно считать надежными для конкретных условий проведения размол в лабораторной дисковой мельнице.

Заключение

Оценены энергетические затраты на размол древесины различных пород с учетом требуемого размера частиц в диапазоне до 200 мкм для последующего создания расходного композита для 3D-печати. Получены зависимости удельных затрат энергии от размеров частиц древесины различных пород. Оценены энергозатраты на размол пород древесины, произрастающих в Северо-Западном регионе нашей страны. Было установлено, что сосна является наиболее предпочтительной с точки зрения удельных затрат энергии на размол и позволяет при минимальном расходе энергии получить необходимый фракционный состав при создании композита с его последующим послойным нанесением с целью изготовления деталей сложной формы с помощью 3D-печати. Для условий подготовки древесины в сравнительно небольших объемах, соответствующих потребностям аддитивных технологий на сегодняшний день, доля энергозатрат на размол от общих расходов с учетом рыночной цены древесины, транспортных расходов, трудозатрат и т. д. может быть существенна, чем вызван интерес производителей и поставщиков мельниц к изысканиям ученых в данной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алашкевич Ю.Д., Юртаева Л.В., Решетова Н.С., Марченко Р.А. Влияние ножевого способа размол волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы // Химия растит. сырья. 2020. № 4. С. 493–499.

Alashkevich Yu.D., Yurtaeva L.V., Reshetova N.S., Marchenko R.A. The Influence of the Knife Method of Grinding Pulp on the Process of Obtaining Powdered Cellulose. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 493–499. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020048121>

2. Борисов Н.А. Производство древесной муки тонкого помола. М., 1964. 21 с. Borisov N.A. *Production of Finely Ground Wood Flour*. Moscow, 1964. 21 p. (In Russ.).

3. Гаузе А.А., Гончаров В.Н. Основы теории и расчета оборудования для подготовки бумажной массы. СПб., 2017. Ч. I. 84 с.

Gauze A.A., Goncharov V.N. *Fundamentals of Theory and Calculation of Equipment for Preparing Paper Pulp*. St. Petersburg, 2017, part 1. 84 p. (In Russ.).

4. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. СПб.: Науч. основы и технологии, 2010. 735 с.

Klesov A.A. *Wood-Polymer Composites*. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2010. 735 p. (In Russ.).

5. Леонович А.А. Физико-химические основы образования древесных плит. СПб.: Химиздат, 2003. 192 с.

Leonovich A.A. *Physico-Chemical Basis for the Formation of Wood Boards*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2003. 192 p. (In Russ.).

6. Леонович А.А. Технология древесных плит: прогрессивные решения. СПб.: Химиздат, 2005. 206 с.

Leonovich A.A. *Wood-Based Panel Technology: Progressive Solutions*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2005. 206 p. (In Russ.).

7. Леонович А.А. Новые древесноплитные материалы. СПб.: Химиздат, 2008. 158 с.

Leonovich A.A. *New Wood-Based Materials*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2008. 158 p. (In Russ.).

8. Липилин А.Б., Векслер М.В., Коренюгина Н.В., Морозов А.М., Кононов Г.Н., Косарев К.Л., Кудряшов А.В. Тонкий помол и сушка древесного сырья в вихревой мельнице-нагревателе // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 139–144.

Lipilin A.B., Vexler M.V., Korenyugina N.V., Morozov A.M., Kononov G.N., Kosarev K.L., Kudryashov A.V. Thin Grinding and Drying of Timber in Vortex Mill-Heater. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2013, no. 3, pp. 139–144. (In Russ.).

9. Мидуков Н.П., Куров В.С., Евдокимов Н.В. Биорефайнинг древесноволокнистого сырья в композиции материала для аддитивных технологий // Хим. волокна. 2023. № 1. С. 66–72.

Midukov N.P., Kurov V.S., Evdokimov N.V. Biorefining of Wood-Fibre Raw Material in a Material Composition for Additive Technologies. *Khimicheskie volokna = Fibre Chemistry*, 2023, vol. 55, no. 1, pp. 53–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10692-023-10426-6>

10. Морозов А.М., Кононов Г.Н., Косарев К.Л., Кудряшов А.В. Использование сканирующей электронной микроскопии для изучения нанопористой структуры продуктов переработки древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 2. С. 72–76.

Morozov A.M., Kononov G.N., Kosarev K.L., Kudryashov A.V. Using of Scanning Electron Microscopy to Studying Nanoporous Structure Products of Timber Processing. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 72–76. (In Russ.).

11. Патент 2318655 РФ, МПК В27L11/06, А23К1/12. Способ получения древесной муки: № 2006123183/12: заявл. 29.06.2006: опубл. 10.03.2008 / А.А. Политов, О.В. Бершак, О.И. Ломовский.

Politov A.A., Bershak O.V., Lomovskij O.I. *Method for Production of Wood Flour*. Patent RF, no. RU 2318655 C1, 2008. (In Russ.).

12. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1977. 368 с.

Sidenko P.M. *Grinding in the Chemical Industry*: 2nd ed., revised. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 368 p. (In Russ.).

13. Спиглазов А.В., Ставров В.П. Влияние размеров древесных частиц и степени наполнения на текучесть композиций с полипропиленом // Пласт. массы. 2004. № 12. С. 50–52.

Spiglazov A.V., Stavrov V.P. The Influence of the Size of Wood Particles and the Degree of Filling on the Fluidity of Compositions with Polypropylene. *Plasticheskie massy*, 2004, no. 12, pp. 50–52. (In Russ.).

14. Хинт И.А., Кузьминов В.А. Производство силикальцита и его применение в жилищном строительстве. Таллин, 1958. 216 с.
- Khint I.A., Kuz'minov V.A. *Production of Silicalcite and its Use in Housing Construction*. Tallin, 1958. 216 p. (In Russ.).
15. Цывин М.М., Котцов С.Г., Шмаков И.В. Производство древесной муки. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 134 с.
- Tsyvin M.M., Kottsov S.G., Shmakhov I.V. *Wood Flour Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 134 p. (In Russ.).
16. Чистова Н.Г., Матыгулина В.Н., Алашкевич Ю.Д. Подготовка древесноволокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах различной модификации // Химия растит. сырья. 2020. № 4. С. 459–466.
- Chistova N.G., Matygulina V.N., Alashkevich Yu.D. Preparation of Wood-Fiber Semi-Finished Products in Knife Machines of Various Modification. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 459–466. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020048189>
17. Aliev S.S., Egamberdiev E.A., Akmalova G.Yu., Ilkhamov G.Yu. Analysis of Physical-Mechanical Properties of New Type of Wood-Polymer Composite Materials. *Harvard Educational and Scientific Review*, 2023, vol. 3, iss. 1, pp. 48–53.
18. Delviawan A., Kojima Y., Kobori H., Suzuki S., Aoki K., Ogoe S. The Effect of Wood Particle Size Distribution on the Mechanical Properties of Wood-Plastic Composite. *Journal of Wood Science*, 2019, vol. 65, art. no. 67. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9>
19. Karinkanta P., Ämmälä A., Illikainen M., Niinimäki J. Fine Grinding of Wood – Overview from Wood Breakage to Applications. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 113, pp. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.03.007>
20. Pokhrel G., Gardner D.J., Han Y. Properties of Wood-Plastic Composites Manufactured from Two Different Wood Feedstocks: Wood Flour and Wood Pellets. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 16, art. no. 2769. <https://doi.org/10.3390/polym13162769>
21. Pokhrel G., Han Y., Gardner D.J. Comparative Study of the Properties of Wood Flour and Wood Pellets Manufactured from Secondary Processing Mill Residues. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 15, art. no. 2487. <https://doi.org/10.3390/polym13152487>
22. Pušnik Črešnar K., Fras Zemljč L., Slemenik Perše L., Bek M. Effect of Wood Fiber Loading on the Chemical and Thermo-Rheological Properties of Unrecycled and Recycled Wood-Polymer Composites. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 24, art. no. 8863. <https://doi.org/10.3390/app10248863>
23. Rajaonariony K.R., Mayer-Laigle C., Piriou B., Rouau X. Comparative Comminution Efficiencies of Rotary, Stirred and Vibrating Ball-Mills for the Production of Ultrafine Biomass Powders. *Energy*, 2021, vol. 227, art. no. 120508. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120508>
24. Sturges H.A. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, vol. 21, iss. 153, pp. 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
25. Wang J., Gao J., Brandt K.L., Wolcott M.P. Energy Consumption of Two-Stage Fine Grinding of Douglas-Fir Wood. *Journal of Wood Science*, 2018, vol. 64, pp. 338–346. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1712-1>

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



Original article

УДК 674.815

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-177-184

Surface Treatment of Fiberboard Wood Pulp Mat with Dispersed Water (by the Example of Arian Sina MDF Company)

Vahid Moazami[✉], *Master of Wood Composite Products, Production Process and Quality Control Manager; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3879-3785>*

Abbas Yari Esbouei, Master of Wood Composite Products, Production Process and Quality Control Manager; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4373-1049>

Hamid Hatefnia, Ph. D., Wood and Paper Science, Manager of Education and Research; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6583-4776>

Arian Sina MDF Company, 18 km Farah Abad Road, Sari City, Mazandaran Province, 4847191376, Iran; moazami.vahid@gmail.com[✉]

Received on August 7, 2023 / Approved after reviewing on November 10, 2023 / Accepted on November 12, 2023

Abstract. This research focuses on the effect of mat water spraying on the production yield and the quality of medium density fiberboard (MDF) on an industrial scale at Arian Sina MDF Company. A total of 180 raw medium density fiberboard panels, each with dimensions of 3.66×1.83×0.016 m, manufactured by the company in 2018, have been used as the experimental samples. These samples have been produced under various conditions, including 3 different groups: 1 – without mat water spraying; 2 and 3 – with mat water spraying using 40 and 50 g/m² of water, correspondingly. Other parameters have included a constant adhesive content (10 % of dry fiber content), a fixed mat moisture content (7 %), and the use of poplar species (70 %) and *Eucalyptus camaldulensis* (30 %). Additionally, a hardener (at 0.8 % of the dry weight of glue) has been applied. The results have demonstrated that water spraying onto both sides of the mat increases the strength properties and improves the production yield. This enhancement is attributed to the reduced time required for transferring heat from the press plates to the core layer of the mat. Furthermore, X-ray vertical profile density analysis has indicated that water spraying onto the mat surface also increases the surface and core layer density of the panels.

Keywords: mat water spraying, medium density fiberboard, vertical profile density, sanding machine

Acknowledgements: We thank Mr. Ali Saeedi, chairman of the board of the Arian Saeed Industrial Group, for financial and spiritual support.

For citation: Moazami V., Esbouei A.Ya., Hatefnia H. Surface Treatment of Fiberboard Wood Pulp Mat with Dispersed Water (by the Example of Arian Sina MDF Company). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 177–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-177-184>

Научная статья

Поверхностная обработка диспергированной водой ковра древесной массы волокнистой плиты (на примере компании «Arian Sina MDF Company»)

В. Моазами[✉], мастер в области изготовления древесно-композитных изделий, менеджер по производственному процессу и контролю качества;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3879-3785>

А.Я. Эсбуэй, мастер в области изготовления древесно-композитных изделий, менеджер по производственному процессу и контролю качества;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4373-1049>

Х. Хатефния, д-р наук в области деревообработки и производства бумаги, менеджер по образованию и исследованиям; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6583-4776>

Компания «Arian Sina MDF», 18-й км, ул. Фарах Абад, г. Сари, пров. Мазендеран, Иран, 4847191376; moazami.vahid@gmail.com[✉]

Поступила в редакцию 07.08.23 / Одобрена после рецензирования 10.11.23 / Принята к печати 12.11.23

Аннотация. Исследование посвящено влиянию увлажнения древесного волокна на выход и качество древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ) в промышленных масштабах на примере компании «Arian Sina MDF». Экспериментальными образцами послужили 180 необработанных панелей древесноволокнистых плит средней плотности размером 3,66×1,83×0,016 м каждая, изготовленных предприятием в 2018 г. Образцы были разделены на 3 группы по условиям производства: 1 – без увлажнения; 2 и 3 – с увлажнением 40 и 50 г/м² воды соответственно. Другие параметры включали постоянное содержание клея (10 % от массы сухого волокна), фиксированную влажность древесного волокна (7 %), а также применение при производстве плит тополя (70 %) и эвкалипта камальдульского (30 %) и отвердителя (0,8 % от сухой массы клея). Результаты показали, что увлажнение древесного волокна с двух сторон повышает прочностные характеристики и выход продукции. Это объясняется сокращением времени, необходимого для передачи тепла от прессовальных плит к среднему слою волокна. Кроме того, рентгеновский анализ плотности вертикального профиля плит также выявил, что увлажнение поверхности древесного волокна увеличивает поверхностную и внутреннюю плотность плит.

Ключевые слова: увлажнение древесного волокна, древесноволокнистая плита средней плотности, плотность древесной массы, шлифовальная машина

Благодарности: Авторы статьи выражают благодарность г-ну Али Саеди, председателю правления промышленной группы «Arian Saeed Industrial Group», за финансовую и моральную поддержку в ходе исследования.

Для цитирования: Moazami V., Esbouei A.Ya., Hatefnia H. Surface Treatment of Fiberboard Wood Pulp Mat with Dispersed Water (by the Example of Arian Sina MDF Company) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 177–184. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-177-184>

Introduction

Medium density fiberboard (MDF) is one of the most favorite wood composites which has been greatly welcomed during recent years. Based on the FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) statistics, MDF, as a product with high applicability, has gained a considerable market share in wood industry and its demand is growingly increasing for construction, furniture and internal decoration [10]. Increasing the production yield in order to reduce the manufacturing cost via elevating the product quality has been one of the great concerns of the key players in this industry. Heating energy is one of the most important factors in wood-based panel industries. During the press process, heating energy is transformed to the core layer of the mat through its contact with hot press plates. Rapid and sufficient heat transfer to the core layer is the prerequisite to polymerization and effective bond formation between the fibers.

Heating facilitates the complete curing of thermoset resin due to accelerating its polymerization. Furthermore, heating through advancing the stress relief mechanism or reducing the fiber strength, affects the mat compression process. Pressure gradient resulted from temperature increase directs the moisture content within the mat toward the void volumes, which finally finds its way to exit. During the press operation, three processes, including simultaneous transformation of mass and heat, stress relief or reducing fiber strength and resin polymerization, happen at the same time. If the press cycle is shorter than needed and hence the press time is less than enough, either the panel surface is blistered or the layers are separated, which all result from the incomplete resin curing or the steam overpressure within the mat [6]. Heat is transferred within the panel by usual heat transfer (emission) and also by flowing the steam toward the core layer of the panel.

As the temperature changes through the mat thickness, the compression rate changes and subsequently there will be a density gradient all along the panel thickness. Achieving a moisture gradient is possible by spraying some water onto the mat surface. The optimum water consumption depends on the fiber shape and mat moisture content. Two-sided water spraying (spraying on both sides of the mat) is crucial to avoid the panel deformation [5]. Wong et al. have studied the panel density profile and its effects on the panel characteristics. According to the results of their studies, the effect of the rate of press closing, pressure, moisture distribution and the way that the panel is pressed on the density of the surface layers is more than that of the core layers [9].

Surface quality is one of the functional characteristics of MDF and under different conditions of relative humidity, low surface quality not only reduces the quality of coating and surface finishing but also increases the necessity of sanding before surface finishing and hence enhances the overall cost [8]. In order to increase both the surface quality of wood composites and their functional properties, there are different solutions, and mat water spraying is one of them.

The high applicability potentials of MDF panels has motivated the key industrialists to increase their production yield in order to decline the costs besides promoting the quality to get the national and international markets. Due to the lack of academic data on the benefits of mat water spraying, the main objective of this research is focusing on the effect of mat water spraying on the yield and the quality of MDF on an industrial scale at Arian Sina Company.

Research Objects and Methods

180 MDF panels with the dimensions of 3.66×1.83×0.016 m have been produced in Arian Sina Company, divided into 3 groups by manufacturing conditions: 1 – with no mat water spraying; 2 and 3 – with mat sprayed with 40 and 50 g/m² of water.

Urea-formaldehyde resin with a solid content of 60 % and molar ratio of (U:F) 1:1.1 has been used at 10 % of dry fiber content.

The moisture content of the mat before hot pressing has been set to 9 % O.D. (Oven Dry). The use of poplar species (70 %) and *Eucalyptus camaldulensis* (30 %), hardener (0.8 % of the dry weight of glue) and other parameters have been established. In order to prevent panel deformation, mat water spraying has been performed on both sides of the panel. The water has been sprayed on the forming belt before the formation of the mat, and after that it has been sprayed on its surface. The mat has been pressed for 180 s at 190 °C and a maximum press pressure of 35 kg/cm².

In order to analyze the temperature of the core layer of MDF panels a thermocouple Testo 925 with the measurement range of –50 to 1000 °C and the precision of ± 1, has been used.

When acquiring the equilibrium moisture content, testing samples have been cut according to EN 622-5 (EN 1998), EN 310 (EN 1996) and EN 319 (EN 1996) for internal bond (IB), and subsequently loaded by the IMAL (IB 600) mechanical tester at Arian Saeed Industrial Group. To determine the vertical density profile, a Sicoscan has been utilized [2–4].

Results and Discussion

Vertical profile densities (fig. 1) show that the water sprayed panels have had a higher peak density. So the panels manufactured with 50 g/m² water sprayed have shown an increase of 17.1 and 6.6 % in peak density compared to that of the non-sprayed panels and those sprayed with 40 g/m² of water, respectively. The panels which were sprayed with 50 g/m² of water have shown an increase of 13.97 % in MOR compared to that of the non-sprayed panels. For the panels sprayed with 40 g/m² of water, this increase has been 9.7 % compared to that of the panels not sprayed with water.

In addition, the results have shown that mat water spraying increases the panel core layer density, as the panels sprayed with 50 and 40 g/m² water have shown 11.45 and 2.65 % increase in core layer density, respectively, compared to that of the panels not sprayed with water.

As can be seen in table, mat water spraying increases the mechanical strength of the treated panels, so that the panels sprayed with 50 g/m² of water have had an increase of about 17.3 % in IB compared to that of the non-sprayed panels. For the panels sprayed with 40 g/m², this increase in IB has been 8.1 % compared to that of the non-sprayed panels.

The effect of mat water spraying on the characteristics of MDF panels manufactured under the same conditions

Mat spray rate, g/m ²	Surface layer density, kg/m ³		Core layer density, kg/m ³	IB, N/mm ²	MOR, N/mm ²	MOE, N/mm ²
50	1127	1127	633	0.75	25.28	2450
40	1041	1073	583	0.67	24.33	2341
0	960	965	568	0.62	22.18	2302

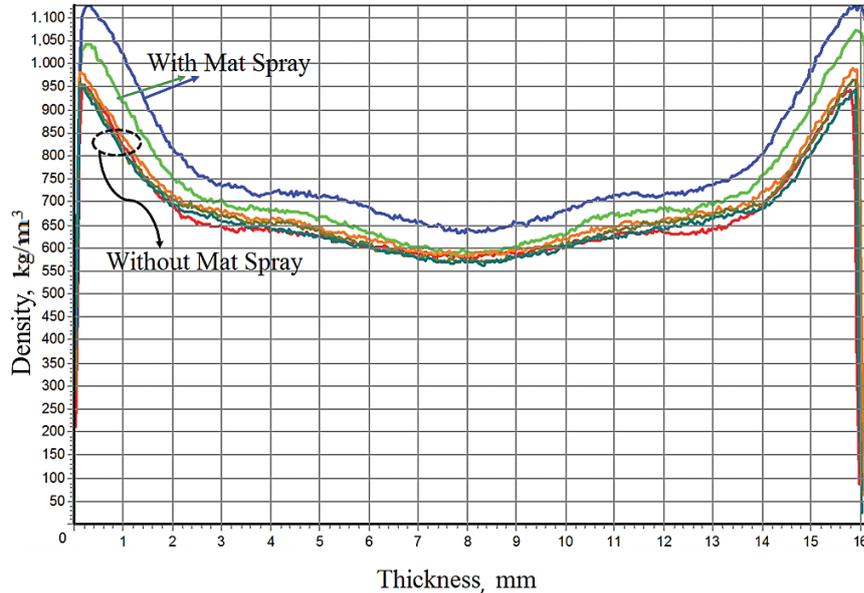


Fig. 1. The vertical density profile of the panels produced with and without mat water spraying

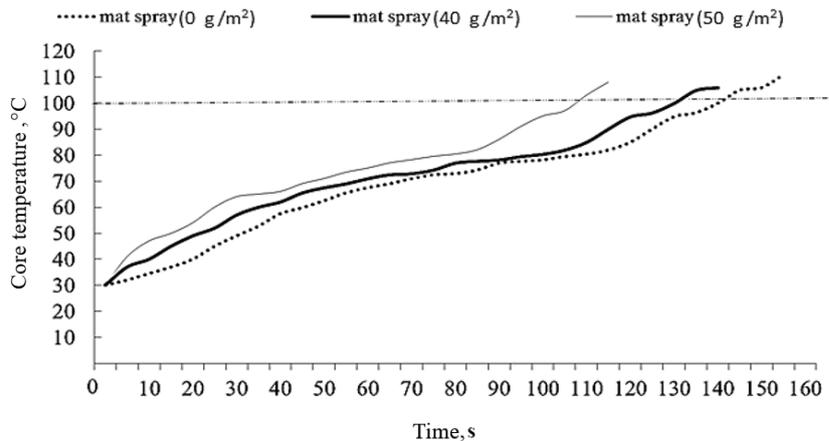


Fig. 2. The effect of mat water spraying onto the core layer temperature

As is shown in fig. 2, after spraying the mat with 0, 40 and 50 g/m² of water, it has taken 140, 130 and 108 s for the core layer of water-sprayed panels to reach the target temperature of 100 °C, respectively. Increasing the amount of water sprayed onto the mat surface from 0 to 50 g/m², has reduced the time required for the core layer to reach the temperature of 100 °C by 29.63 %. The higher the moisture content resulted from water spraying within both surface layers of the mat, the higher the mechanical strength characteristics in the final product has been [7]. Mat water spraying, especially at the amount of 50 g/m², accelerates the heat transfer from the press plates to the core layer of the panel, improves the curing of resin and hence promotes IB in the final product. The moisture which comes from water sprayed onto the mat softens the fibers and increases their flexibility which enhances the initial pressure and subsequently the density of surface layers that

altogether promote the bending strength [1]. The core layer density independently affects the internal bond. The higher the core density, the higher the internal bond of the panel is [6]. In addition, as thermocouples have shown, water spraying facilitates the heat transfer. Furthermore, water spraying not only improves the panel quality, but also reduces the manufacturing costs by enhancing the process productivity (yield).

In order to precisely determine panel thickness, to achieve a smooth and homogenous surface, to remove the loose surface layers, as well as to obtain a higher density surface layers and hence a higher MOR, it is crucial to sand the surface of the panels. The results of vertical profile density measurement (fig. 3) have shown that mat water spraying reduces the thickness of the loose surface layer by 0.7 mm. The density of the surface layers is relatively low, which is removed through the sanding process and as a result improves the panel's strength.

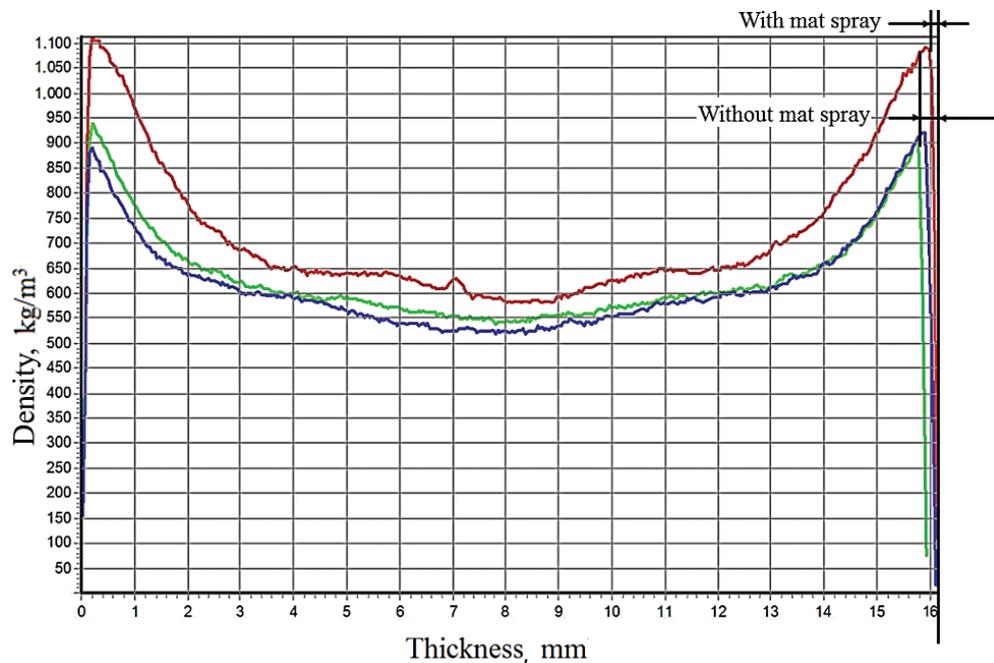


Fig. 3. The effect of mat spraying on the loose surface structure

The amount of this loose and low density layer to be removed by sanding machines, is determined considering the vertical density profile of the panels. Since water spraying reduces the dust produced in each panel with the dimensions of $0.016 \times 1.83 \times 3.66$ m by 2 kg, it can be concluded that the spraying treatment reduces the manufacturing cost in both terms of sanding machine work and raw materials cost.

Conclusions

Considering the importance of production yield while maintaining the panel quality, in this research we have investigated the effect of mat spraying on the production yield and quality of MDF on an industrial scale. After water spraying

onto the mat surface, determining the core layer temperature and strength properties of the products, the following results have been obtained. It is worth noting that based on the results obtained in the research performed at Arian Sina company, increasing the amount of water sprayed onto the mat to higher than 50 g/m² is not recommended, since it leads to the reduction of panel strength properties and increases the waste production. This could be related to the steam augmentation in the core layer and its low possibility to be discharged.

- 1) Mat spraying has a considerable effect on the panel mechanical properties;
- 2) Mat spraying increases the peak and core layer density of the panels;
- 3) Increasing the amount of water sprayed onto the mat from 0 to 50 g/m², reduces the time required by the core layer to reach the target temperature of 100 °C by 29.63 %;
- 4) Mat water spraying reduces the thickness of the surface layer which is required to be removed in a sanding machine and thus diminishes the dust produced while sanding the panel with the dimensions of 0.016×1.83×3.66 m by 2 kg per panel;
- 5) Mat water spraying accelerates the heat transfer from the press plates to the core layer.

It is predicted that the higher surface density resulted from water spraying allows the utilization of the lower grammage veneer layers.

Since the strength properties, especially the internal bond, increase, a 5 % saving in resin consumption is expected.

The research has been carried out in the Multidaylight press and the results may vary in continuous presses.

REFERENCES

1. Cai Z., Muehl J., Winandy J. Effects of Pressing Schedule on Formation of Vertical Density Profile for MDF Panels. *40th International Wood Composites Symposium Proceedings (Seattle, Washington; April 11–12, 2006)*. Washington, Pullman, Washington State University, 2006. 11 p.
2. *European Standard EN 310. Wood Based Panels, Determination of Modulus of Elasticity Inbending and Bending Strength*. Brussels, European Standardization Committee, 1996. 8 p.
3. *European Standard EN 319. Wood Based Panels, Determination of Tensile Strength Perpendicular to Plane of the Panel*. Brussels, European Standardization Committee, 1996. 7 p.
4. *European Standard EN 622-5. "Fiberpanel-Specifications-Part 5. Requirements for Dry Process Panel (MDF), TES*. Brussels, European Standardization Committee, 1998. 12 p.
5. Maloney T.M. *Modern Particlepanel & Dry-Process Fibrepanel Manufacturing*. San Francisco, Miller Freeman Publ., 1977. 672 p.
6. Moazami V., Afsoni F., Dadashi S., Dadashi E. Evaluation the Mechanical Properties of Medium Density Fiber Panel of Domestic Production and Imported with Help of Vertical Density Profile, Infrared Rays, Spectroscopy and Imagine Analyses (Case Study of Arian Sina Co). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 2017, vol. 32, iss. 1, pp. 145–156. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2017.107595>
7. Nemli G., Aydın I., Zekoviç E. Evaluation of Some of the Properties of Particlepanel as Function of Manufacturing Parameters. *Materials & Design*, 2007, vol. 28, iss. 4, pp. 1169–1176. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.015>
8. Ozdemir T., Hiziroglu S., Malkocoglu A. Influence of Relative Humidity on Surface Quality and Adhesion Strength of Coated Medium Density Fiberpanel (MDF)

Panels. *Materials & Design*, 2009, vol. 30, iss. 7, pp. 2543–2546. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.036>

9. Wong E.D., Zhang M., Han G., Kawai S., Wang Q. Formation of the Density Profile and its Effects on the Properties of Fiberpanel. *Journal of Wood Science*, 2000, vol. 46, pp. 202–209. <https://doi.org/10.1007/BF00776450>

10. Zheng Y., Pan Z., Zhang R., Jenkins B.M., Blunk S. Properties of Medium-Density Particlepanel from Saline Athel Wood. *Industrial Crops and Products*, 2006, vol. 23, iss. 3, pp. 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.09.003>

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*581.55(470.620)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-185-192

Лесохозяйственные мероприятия в полезащитных лесных полосах Краснодарского края

Н.В. Примаков^{1,2✉}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABD-8930-2021](https://orcid.org/0000-0001-9225-024X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

В.В. Танюкевич³, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAG-2488-2019](https://orcid.org/0000-0001-8052-6835),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8052-6835>

¹Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, Россия, 350040; nik-primakov@yandex.ru✉

²Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044; nik-primakov@yandex.ru✉

³Донской государственный аграрный университет, ул. Кривошлыкова, д. 24, пос. Персиановский, Октябрьский р-н, Ростовская обл., Россия, 346493; vadimlug79@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.22 / Одобрена после рецензирования 29.06.22 / Принята к печати 30.06.22

Аннотация. В процессе роста и развития лесных полос происходит изменение их некоторых таксационных характеристик и конструкции. Лесомелиоративные комплексы подвержены гомеостазу. Изменение конструкции полезащитных лесных полос приводит к недобору урожая, потере прибыли сельскохозяйственных организаций, а также к ухудшению экологии почв полей. Выход из этой ситуации может быть найден в применении системы мероприятий, важным звеном которой являются лесохозяйственные мероприятия. Цель работы – определить сроки и виды лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение агроэкологической эффективности полезащитных лесомелиоративных комплексов на сельскохозяйственных землях Краснодарского края. Использовались данные инвентаризации защитных лесных насаждений 2019 г. и данные, полученные авторами в 2015–2021 гг. в Кущевском и Ленинградском районах Краснодарского края. По данным строились графики зависимости запаса от возраста и высоты для некоторых древесных пород полезащитных лесомелиоративных комплексов. Установлено, что в районе исследования наибольшее количество площадей полезащитных лесных полос имеют плотную конструкцию – 538,5 га, причем 501,7 га из них приходится на деревья III класса возраста. Значительное увеличение запаса насаждений отмечается в возрасте: *Robinia pseudoacacia* L. – 15 лет, *Fraxinus excelsior* L. – 25 лет, *Gleditsia triacanthos* L. – 10 лет, *Ulmus pumila* L. – 35 лет. Получены уравнения множественной связи зависимости запаса от возраста и высоты для основных древесных пород. Эти уравнения могут применяться для прогнозирования сроков проведения лесоводственных мероприятий с целью поддержания рекомендуемой для изучаемого региона ажурной конструкции лесных полос.

Ключевые слова: конструкция лесных полос, защитные лесные полосы, лесохозяйственные мероприятия, древесные породы, мелиорация, мелиоративная эффективность, Краснодарский край

Для цитирования: Примаков Н.В., Танюкевич В.В. Лесохозяйственные мероприятия в полезащитных лесных полосах Краснодарского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 185–192. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-185-192>

Original article

Forestry Measures in Shelterbelts of the Krasnodar Territory

Nikolay V. Primakov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABD-8930-2021](https://orcid.org/0000-0001-9225-024X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

*Vadim V. Tanyukevich*³, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAG-2488-2019](https://orcid.org/0000-0001-8052-6835),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8052-6835>

¹Kuban State University, ul. Stavropol'skaya, 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation; nik-primakov@yandex.ru

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, ul. Kalinina, 13, Krasnodar, 350044, Russian Federation; nik-primakov@yandex.ru

³Don State Agrarian University, ul. Krivoshlykova, 24, pos. Persianovskij, Oktyabrskij District, Rostov Region, 346493, Russian Federation; vadimlug79@mail.ru

Received on April 3, 2022 / Approved after reviewing on June 29, 2022 / Accepted on June 30, 2022

Abstract. In the process of growth and development of forest belts, some of their taxation characteristics and design change. Forest reclamation complexes are subject to homeostasis. Changing the design of shelterbelts leads to crop shortages, loss of profits for agricultural organizations, as well as to the deterioration of the ecology of field soils. A way out of this situation can be found in the application of a system of measures, an important part of which is forestry measures. The aim of the research has been to determine the timing and types of forestry measures aimed at improving the agro-ecological efficiency of protective forest reclamation complexes on agricultural lands of the Krasnodar Territory. Data from the 2019 inventory of protective forest plantations and data obtained by the authors in 2015–2021 in the Kushchevskij and Leningradskij Districts of the Krasnodar Territory have been used. According to the data obtained, graphs of the dependence of stock on the age and height have been constructed for some tree species of field protection forest reclamation complexes. It has been established that in the study area the largest number of areas of shelterbelts have a dense structure – 538.5 ha, and 501.7 ha of them are trees of the III age class. A significant increase in the stock of plantations has been noted at the age of: *Robinia pseudoacacia* L. – 15 years, *Fraxinus excelsior* L. – 25 years, *Gleditsia triacanthos* L. – 10 years, *Ulmus pumila* L. – 35 years. The equations of the regression dependence of stock on the age and height for the main tree species have been obtained. These equations can be used to predict the timing of forestry measures in order to maintain the openwork design of forest belts recommended for the region under study.

Keywords: forest belt design, shelterbelt, forestry measures, tree species, reclamation, reclamation efficiency, the Krasnodar Territory

For citation: Primakov N.V., Tanyukevich V.V. Forestry Measures in Shelterbelts of the Krasnodar Territory. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 4, pp. 185–192. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-185-192>

Введение

Площадь сельскохозяйственных земель Краснодарского края составляет 4692,9 тыс. га. Кубань считается лидером в агропромышленном комплек-



се страны [1, 11]. Неудивительно, что при столь активном использовании земель в последнее десятилетие наблюдается деградация сельскохозяйственных угодий края, что выражается в снижении средневзвешенных показателей содержания в почве: гумуса – с 3,9 до 3,6 %, подвижного фосфора – с 34 до 27 мг/кг, подвижного калия – с 413 до 405 мг/кг [5, 15, 16, 19]. Для борьбы с этими негативными процессами применяется комплекс мероприятий [7, 10, 13, 17], одним из основных элементов которого является агролесомелиорация.

Рост и развитие лесных полос сопровождаются изменением их некоторых таксационных характеристик и конструкции [8, 9, 12]. Лесомелиоративные комплексы подвержены гомеостазу. Защищенность агроландшафтной территории может изменяться от полной до отсутствующей и наоборот, что зависит от ее инварианта. По данным ряда исследователей [2, 4, 14, 18, 20], изменение конструкции лесных полос оказывает влияние на дальность мелиоративного влияния. На территории Краснодарского края для полезащитных лесомелиоративных комплексов, в соответствии с методическими рекомендациями по проектированию и выращиванию защитных лесных насаждений на землях гидрографической сети лесостепной и степной зон европейской части РСФСР и правилами проектирования и создания защитных лесных насаждений и ухода за ними на землях сельскохозяйственного назначения, рекомендуемыми являются ажурная и продуваемая конструкции.

Цель работы – определить сроки и виды лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение агроэкологической эффективности полезащитных лесомелиоративных комплексов на сельскохозяйственных землях Краснодарского края.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на территории Кушевского и Ленинградского районов Краснодарского края. Регион относится к степной зоне, среднее годовое количество осадков составляет 479 мм. Климат умеренно-континентальный. Почвы характеризуются как черноземы обыкновенные слабогумусные. Рельеф – пологоволнистый со слабым уклоном на запад и северо-запад. Площадь изучаемой территории – 237,2 тыс. га. Сельскохозяйственные угодья занимают более 80 % от общей площади районов.

Объектом исследования стали разновозрастные полезащитные лесные насаждения указанных районов. В работе использовались данные инвентаризации этих насаждений 2019 г. и сведения, собранные авторами в ходе натуральных обследований в 2015–2021 гг. [9].

В лесных полосах закладывали временные пробные площади в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки», исходя из требования наличия на них не менее 200 деревьев основной породы. Всего было заложено 12 пробных площадей. Методом сплошного перечета определяли количество стволов, происхождение главных и встречающихся древесных и кустарниковых пород, вид лесополос и их состав, по данным таксации – средний диаметр и высоту растений. Плотность конструкций защитных лесных насаждений оценивали в облиственном состоянии оптическим методом [6].

По полученным данным строили графики зависимости запаса от возраста и высоты для главных древесных пород полезационных лесомелиоративных комплексов. Количество деревьев, по результатам обследования которых строили графики, варьировало от 9 до 33 в зависимости от встречаемости изучаемых древесных пород в насаждениях. Для построения графиков проводили анализ и усреднение таксационных характеристик главных пород. Построение графиков осуществляли с применением программы OriginPro 2018. С целью определения аналитической формы связи проводили регрессионный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Площади полезационных лесных полос были распределены по конструкциям и древесным породам (см. таблицу).

Распределение площадей полезационных лесных полос по конструкциям и древесным породам для района исследования

The distribution of shelterbelt areas by structure and tree species for the study area

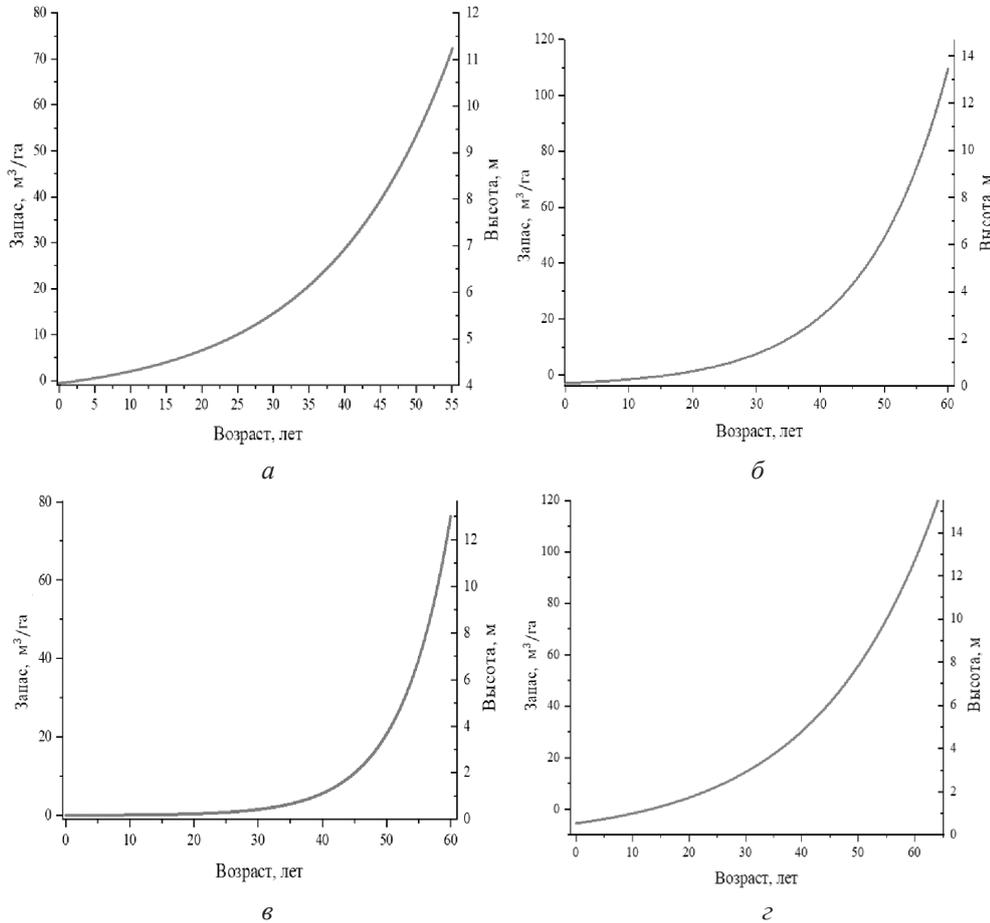
Класс возраста (возраст, лет)	Площадь лесной полосы, га									Всего
	с конструкцией			с главной породой						
	ажур- ной	проду- ваемой	плот- ной	вязом	роби- нией	ясе- нем	кле- ном	абрико- сом	гледич- ией	
I (0–20)	5,1	0,1	0,3	–	5,4	–	–	–	–	5,5
II (21–40)	19,9	5,7	9,1	–	33,7	1,0	–	–	–	34,7
III (41–60)	172,1	60,7	501,7	16,7	367,5	173,3	9,9	16,0	151,5	734,5
IV (61–80)	10,0	12,4	27,4	2,0	25,5	5,2	2,3	–	14,8	49,8
<i>Итого</i>	207,1	78,9	538,5	18,7	432,1	179,5	12,2	16,0	166,3	824,5

Из представленных в таблице данных следует, что в изученном районе наибольшее количество площадей полезационных лесных полос имеют плотную конструкцию – 538,5 га, причем максимальная площадь – 501,7 га – приходится на III класс возраста. Для данного района, относящегося к I-му агролесомелиоративному району, наукой и практикой рекомендована ажурная конструкция лесных полос.

Анализ распределения площадей по видам древесных пород показал, что значительные участки занимают полезационные лесные полосы из таких главных пород, как робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.), ясень обыкновенный и ясень зеленый (*Fraxinus excelsior* L., *F. lanceolata* B.), гледичия трехколючковая (*Gleditsia triacanthos* L.). Существенно меньше площадей отведено под вяз (*Ulmus* L.), клен (*Acer* L.) и абрикос обыкновенный (*Prunus armeniaca* L.).

В ходе исследования было отмечено изменение конструкции полезационных лесных полос, что приводит к недобору урожая и, следовательно, потере прибыли сельскохозяйственных организаций, а также к ухудшению экологии почв полей. Выход из создавшейся ситуации может быть найден в применении

системы мероприятий, важным звеном которой являются лесохозяйственные мероприятия [3]. Как известно, на конструкцию лесных полос оказывают влияние запас, возраст и высота. Для некоторых древесных пород нами получены зависимости этих показателей (см. рисунок).



Зависимость запаса от возраста и высоты для: *a* – робинии лжеакации; *б* – ясеня обыкновенного; *в* – вяза мелколистного; *г* – гледичии трехколючковой
The dependence of the stock on age and height for: *a* – *Robinia pseudoacacia* L.; *б* – *Fraxinus excelsior* L.; *в* – *Ulmus parvifolia* L.; *г* – *Gleditsia triacanthos* L.

Как следует из рисунка, интенсивный рост робинии лжеакации в районе исследования начинается с возраста 15 лет. Максимальный запас при высоте 11,2 м составляет 70,3 м³ в возрасте 53 года к моменту исследования. Регрессионный анализ результатов зависимости запаса от возраста и высоты позволил получить математическое уравнение для робинии лжеакации $y = 2,5484 + 6,4984a - 0,2191b$, где y – запас; a – высота; b – возраст.

Наиболее интенсивный рост ясеня обыкновенного приходится на возраст более 25 лет. Максимальный запас при высоте 13,6 м – 110,0 м³ в 62 года. Для ясеня обыкновенного получено следующее математическое уравнение: $y = 4,2927 + 5,9663a - 0,09961b$.

Возраст начала интенсивного роста для вяза мелколистного – 35 лет. Максимальный запас по достижении высоты 13,0 м составляет 72,0 м³ в возраст-

те 62 года. Зависимость запаса от возраста и высоты выражается следующим уравнением: $y = 10,7314 - 0,9718a + 1,164b$.

Интенсивный рост гледичии трехколючковой в районе исследования начинается в 10 лет. Высоте 14,9 м и возрасту 65 лет соответствует максимальный запас – 120,0 м³. Регрессионное уравнение для гледичии трехколючковой имеет вид $y = 6,3153 + 5,7981a - 0,09279b$.

Заключение

Исследование показало, что состояние большинства лесных полос изученных районов Краснодарского края удовлетворительное. Наибольшее количество площадей полезащитных лесных полос имеют нехарактерную для данного региона плотную конструкцию – 538,5 га. Площадь таких лесных насаждений максимальна для III класса возраста – 501,7 га. Значительное увеличение запаса насаждений приходится на возраст: робинии лжеакации – 15 лет, ясеня обыкновенного – 25 лет, гледичии трехколючковой – 10 лет, вяза мелколистного – 35 лет. Полученные уравнения множественной связи зависимости запаса от возраста и высоты для основных древесных пород могут применяться при прогнозировании сроков проведения лесоводственных мероприятий с целью поддержания оптимальной для изучаемого региона конструкции полезащитных насаждений.

Лесному хозяйству региона рекомендуется обратить внимание на состояние полезащитных лесных полос, своевременно проводить санитарные рубки и рубки ухода для поддержания конструкций лесных полос, что позволит повысить их мелиоративную эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Власова Н.С., Хорольская Т.Е. Анализ и перспективы развития агропромышленного комплекса Краснодарского края // Вестн. Акад. знаний. 2020. № 40(5). С. 104–109.
Vlasova N.S., Khorolskaya T.E. Analysis and Prospects for the Development of the Agro-Industrial Complex of the Krasnodar Territory. *Vestnik Akademii znaniy* = Bulletin of the Academy of Knowledge, 2020, no. 40(5), pp. 104–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2304-6139-2020-10600>
2. Грибачева О.В., Чернодубов А.И., Сотников Д.В. Динамика рангового распределения деревьев по высоте в полезащитной полосе с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клена остролистного (*Acer platanoides* L.) // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 15–25.
Gribacheva O.V., Chernodubov A.I., Sotnikov D.V. Dynamics of Height Range Distribution of Trees in the Forest Shelter Belt with Participation of English Oak (*Quercus robur* L.) and Norway Maple (*Acer platanoides* L.). *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2020, vol. 10, no. 1(37), pp. 15–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/2>
3. Желдак В.И., Прока И.Ю. Совершенствование систем лесоводственных мероприятий для лесов определенного породного состава // Лесохоз. информ. 2021. № 4. С. 38–59.
Zheldak V.I., Proka I.Yu. Improvement of Systems of Silvicultural Activities for Forests of a Certain Species Composition. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2021, no. 4, pp. 38–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.4.03>

4. Михин В.И., Михина Е.А. Особенности формирования защитных насаждений из березы повислой в центральной лесостепи России // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 4(36). С. 41–49.

Mikhin V.I., Mikhina E.A. Features of Formation of Protective Plantings from a Birch Hanging in the Central Forest-Steppe of Russia. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 4(36), pp. 41–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/5>

5. О состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края в 2020 году: докл. / М-во природ. ресурсов Краснодар. края. Краснодар, 2021. 447 с.

On the State of Nature Management and Environmental Protection of the Krasnodar Territory in 2020: Report. Krasnodar, Ministry of Natural Resources of the Krasnodar Territory, 2021. 447 p. (In Russ.).

6. Патент 2285389 РФ, МПК А01G 23/00. Способ определения оптической плотности ветрозащитного барьера и ажурности лесных полос: № 2004126910/12: заявл. 07.09.2004, опубл. 20.10.2006 / Ю.П. Сухановский, В.В. Олещицкий; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии.

Sukhanovskij Yu.P., Oleshitskij V.V. *Method for Determining the Optical Density of a Wind Barrier and the Openwork Pattern of Forest Strips*. Patent RF no. RU 2285389 C2, 2006. (In Russ.).

7. Постолов В.Д., Кругляк В.В. Роль агролесомелиоративных мероприятий в защите почв от деградации // Модели и технологии природообустройства (регион. аспект). 2021. № 1(12). С. 13–17.

Postolov V.D., Kruglyak V.V. Role of Agricultural Forest Recreation Measures in Protecting Soils from Degradation. *Modeli i tekhnologii prirodoobustrojstva (regional'nyj aspekt) = Models and Technologies Environmental Engineering (Regional Aspect)*, 2021, no. 1(12), pp. 13–17. (In Russ.).

8. Примаков Н.В. Изменчивость лесоводственных характеристик полезащитных лесных насаждений Краснодарского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 60–68.

Primakov N.V. Variability of Silvicultural Characteristics of Forest Shelterbelts in Krasnodar Krai. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 60–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-60-68>

9. Рулев А.С., Рулева О.В., Сучков Д.К. Почвенно-таксационная характеристика модульных полезащитных лесных полос // Лесохоз. информ. 2021. № 1. С. 83–92.

Rulev A.S., Ruleva O.V., Suchkov D.K. Soil and Taxation Assessment of Modular Protective Forest Strips. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2021, no. 1, pp. 83–92. (In Russ.).

10. Сафронова Т.И., Соколова И.В. Обоснование земельно-охранной системы повышения агроресурсного потенциала агроландшафтов // International Agricultural Journal. 2020. Т. 63, № 3. С. 84–92.

Safronova T.I., Sokolova I.V. Justification of the Land and Security System Increases in Agroresource Potential Agrolandscapes. *International Agricultural Journal*, 2020, vol. 63, no. 3, pp. 84–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10185>

11. Симаков Г.А. Развитие агропромышленного комплекса в Краснодарском крае // Молодой ученый. 2017. № 29(163). С. 59–61.

Simakov G.A. Development of the Agro-industrial Complex in the Krasnodar Territory. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*, 2017, no. 29(163), pp. 59–61. (In Russ.).

12. Таникевич В.В., Рулев А.С., Бородычев В.В., Тюрин С.В., Хмелева Д.В., Кваша А.А. Продуктивность и природоохранная роль полезащитных лесонасаждений *Robinia pseudoacacia* L. Прикубанской равнины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 88–97.

Tanyukevich V.V., Rulev A.S., Borodychev V.V., Tyurin S.V., Khmeleva D.V., Kvasha A.A. Productivity and Environmental Role of Forest Shelterbelts of *Robinia pseudoacacia* L. of the Kuban Lowland. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 6, pp. 88–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-88-97>

13. Тубалов А.А. Картографирование, оценка состояния, типизация агролесоландшафтов – решение базовых научных задач при адаптивно-ландшафтном агролесомелиоративном обустройстве территорий // *Природообустройство*. 2019. № 5. С. 50–56.

Tubalov A.A. Map Making, Assessment of the State, Typification of Agroforest Landscapes – Solution of Basic Scientific Tasks under Adaptive – Landscape Agroforest Reclamation Development of Areas. *Prirodoobustrojstvo* = Environmental Engineering, 2019, no. 5, pp. 50–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-5-50-56>

14. Bao Y., Li H., Zhao H. Effect of Shelterbelts on Winter Wheat Yields in Sanded Farmland of North-Western Shandong Province, China. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2012, vol. 10, iss. 3–4, pp. 1399–1403. <https://doi.org/10.1234/4.2012.3695>

15. Bastida F., Zsolnay A., Hernández T., García C. Past, Present and Future of Soil Quality Indices: A Biological Perspective. *Geoderma*, 2008, vol. 147, iss. 3–4, pp. 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>

16. Baude M., Meyer B.C., Schindewolf M. Land Use Change in an Agricultural Landscape Causing Degradation of Soil Based Ecosystem Services. *The Science of the Total Environment*, 2019, vol. 659, pp. 1526–1536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.455>

17. Félix G.F., Scholberg J.M.S., Clermont-Dauphin C., Cournac L., Tiftonell P. Enhancing Agroecosystem Productivity with Woody Perennials in Semi-Arid West Africa: a Meta-Analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, vol. 39, art. no. 57. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0533-3>

18. Juang J.-Y., Zhang J.-C., Yang Y., Zhang B., Li J. Effect of Forest Shelter-Belt as a Regional Climate Improver along the Old Course of the Yellow River, China. *Agroforestry Systems*, 2017, vol. 91, pp. 393–401. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9928-9>

19. Karabutov A.P., Tyutyunov S.I., Solovichenko V.D. Biologization – Strategic Basis of the Agriculture in the Central Black Soil Region of the Russian Federation. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 1427–1432.

20. Saint-Laurent D., Berthelot J.S., Gervais-Beaulac V. Habitat Fragmentation and Structure and Composition of Tree Populations in a Agroforestry Landscape (Southern Québec, Canada). *Agroforestry Systems*, 2018, vol. 92, pp. 1517–1534. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0099-0>

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 676.1.054.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-193-201

Повышение ресурсного потенциала древесного сырья

М.А. Зырянов[✉], канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

С.О. Медведев, канд. экон. наук; *ResearcherID*: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

А.П. Мохирев, д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [N-9961-2019](https://orcid.org/0000-0002-1692-3323),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; zuryanov13@mail.ru[✉], medvedev_serega@mail.ru, ale-mokhirev@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.23 / Одобрена после рецензирования 09.02.24 / Принята к печати 13.02.24

Аннотация. Согласно стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г., утвержденной распоряжением премьер-министра России № 312р от 11.02.2021, вклад лесной отрасли в экономику страны должен увеличиться в 2 раза, в т. ч. за счет глубокой переработки древесины. С этой целью активное развитие получают предприятия по глубокой переработке древесного сырья. Следовательно, будет возникать дефицит древесного сырья, что приведет к острой потребности в расширении сырьевой базы указанных производств. Несмотря на это, как показал анализ практического опыта современных лесозаготовительных предприятий, на сегодняшний день при лесозаготовительных работах с лесосеки вывозится только стволовая часть дерева, а остальная биомасса в виде пневой древесины, веток, сучьев и вершин подвергается сжиганию или захоронению, хотя данные части дерева являются ценным сырьем для производства многих видов продукции деревоперерабатывающих предприятий. Такое положение дел обусловлено отсутствием эффективной технологии переработки потенциального сырья в местах его образования и комплекса мобильных машин для ее реализации. В результате для переработки отходов лесозаготовок в виде ветвей, веток и сучьев была предложена технология производства древесной и хвойной муки, технологической щепы и древесноволокнистого полуфабриката, а также мобильное оборудование для ее осуществления. В статье представлены технологические решения и модели оборудования, построенные в системе автоматизированного проектирования SolidWorks. Внедрение предложенных технологий, машин и механизмов увеличит долю заготавливаемого сырья с единицы площади, снизит экологическую нагрузку на окружающую среду от лесозаготовительного процесса, повысит эффективность отрасли.

Ключевые слова: ресурсный потенциал, эффективность использования ресурсов, лесозаготовка, древесина, отходы лесозаготовки, древесное сырье, комплексная переработка биомассы дерева

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-78-10002, <https://rscf.ru/project/22-78-10002/>.

Для цитирования: Зырянов М.А., Медведев С.О., Мохирев А.П. Повышение ресурсного потенциала древесного сырья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 193–201. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-193-201>

Original article

Increasing the Resource Potential of Wood Raw Materials

Mikhail A. Zyryanov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

Sergey O. Medvedev, Candidate of Economics; ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

Aleksandr P. Mokhitev, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-9961-2019](https://orcid.org/0000-0002-1692-3323),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety "Krasnoyarskiy rabochiy", 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; zuryanov13@mail.ru[✉], medvedev_serega@mail.ru, ale-mokhitev@yandex.ru

Received on November 15, 2023 / Approved after reviewing on February 9, 2024 / Accepted on February 13, 2024

Abstract. According to the strategy for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030, approved by Order of the Prime Minister of Russia no. 312r dated February 11, 2021, the contribution of the forestry industry to the country's economy should increase by 2 times, including through deep wood processing. To this end, enterprises for deep processing of wood raw materials will be actively developed. Consequently, there will be a shortage of wood raw materials, which will lead to an urgent need to expand the raw material base of these industries. Despite this, as the analysis of the practical experience of modern logging enterprises has shown, today, during logging operations, only the stem part of the tree is removed from the cutting area, and the rest of the biomass in the form of stumpwood, branches, twigs and tops is burned or buried, although these parts of the tree are valuable raw materials for the production of many types of products of wood processing enterprises. This state of affairs is due to the lack of effective technology for processing potential raw materials in the places of their formation and a complex of mobile machines for its implementation. As a result, a technology for the production of wood and coniferous flour, technological chips and semi-finished wood-fiber products, as well as mobile equipment for its implementation, has been proposed for the processing of logging waste in the form of tops, branches and twigs. The article presents technological solutions and equipment models built in the SolidWorks computer-aided design system. The introduction of the proposed technologies, machines and mechanisms will increase the share of harvested raw materials per unit area, reduce the environmental load from the logging process, and increase the efficiency of the industry.

Keywords: resource potential, resource efficiency, logging, wood, logging waste, wood raw material, complex processing of wood biomass

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-78-10002, <https://rscf.ru/project/22-78-10002/>.

For citation: Zyryanov M.A., Medvedev S.O., Mokhitev A.P. Increasing the Resource Potential of Wood Raw Materials. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 4, pp. 193–201. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-193-201>



Введение

Как показал анализ научной литературы [1, 2, 4, 8, 10, 18–26], на сегодняшний день существует ряд теорий, направленных на решение вопроса комплексной переработки биомассы дерева. Так, в работе В.Д. Никишова [11] описаны способы использования древесной зелени и коры. В.В. Коробов, Н.П. Рушнов, М.И. Брик [5–7] рассматривали отходы лесозаготовок и целые тонкомерные деревья, остающиеся на лесосеке, как источник получения дополнительного древесного сырья для древесно-плитного и гидролизного производств. Исследованиями в области производства из порубочных остатков технологической щепы и целлюлозы занимались И.В. Григорьев с соавт. [9], И.В. Гнатовская [3]. Данные работы послужили основой для поиска технологических решений в указанной области. При этом результаты анализа практического опыта отечественных предприятий (посредством опроса, наблюдения и изучения отчетов анализировались различные лесозаготовительные предприятия Сибири и Северо-Запада страны) свидетельствуют о том, что с лесосек вывозится только стволовая древесина, а большая часть биомассы дерева оставляется для дальнейшего перегнивания или сжигается. Такое состояние использования биомассы в первую очередь обусловлено высокими затратами на доставку потенциального сырья в виде отходов лесозаготовок к стационарным деревоперерабатывающим заводам. Это происходит ввиду значительной удаленности деревоперерабатывающих предприятий от лесозаготовительных участков, где образуются отходы, а также низкого коэффициента загрузки транспортных средств из-за малой укладочной плотности ветвей, веток и сучьев. Таким образом, с точки зрения целесообразности транспортировки отходов лесозаготовок их необходимо перерабатывать в полуфабрикаты или готовую товарную продукцию непосредственно в местах образования потенциального сырья, что, в свою очередь, существенно снизит транспортные расходы посредством повышения эффективности загрузки транспортных машин.

Цель исследования – разработка технологии и оборудования, позволяющих перерабатывать отходы лесозаготовок в местах их образования.

Объекты и методы исследования

В ходе анализа литературных источников и проведения серии предварительных экспериментов было установлено, что из отходов лесозаготовок в виде ветвей, веток и сучьев целесообразно изготавливать хвойную и древесную муку, древесноволокнистый полуфабрикат и технологическую щепу. В качестве объектов исследования были выбраны технологические операции по переработке ветвей, веток и сучьев в условиях лесозаготовок, а также конструкции мобильных деревоперерабатывающих машин. Основным методом исследования стало моделирование в среде программы SolidWorks, где были разработаны конструкции 3D-моделей мобильных деревоперерабатывающих машин. Выполнено имитационное моделирование функционирования механизмов и машин в условиях воздействия различных силовых и природно-климатических факторов с использованием модуля Flow Simulation.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе выполнения исследования были разработаны технология переработки древесного сырья и система мобильных машин для применения этой технологии (рис. 1).



Рис. 1. Технологическая схема участков переработки древесного сырья: 1 – транспортно-сортировочная машина на базе форвардера; 2 – мобильная окорочная машина; 3 – мобильная рубительная машина; 4 – мобильная линия по производству древесноволокнистого полуфабриката; 5 – мобильная ножевая установка для производства хвойно-витаминной муки; 6 – мобильная ножевая установка для производства древесной муки

Fig. 1. The technological diagram of wood raw material processing areas: 1 – forwarder-based transport and sorting machine; 2 – mobile debarker; 3 – mobile chipper; 4 – mobile line for the production of semi-finished wood-fiber products; 5 – mobile knife plant for the production of coniferous-vitamin flour; 6 – mobile knife plant for the production of wood flour

Как видно из технологической схемы, в первую очередь осуществляется сбор, разделение, сортировка и транспортировка порубочных остатков на промежуточный или нижний склад. Данная схема по своей сути выступает научной основой процесса эффективной переработки биомассы дерева в условиях лесозаготовительных работ. В ходе исследования была проведена серия экспериментов, расчетов и апробаций, позволивших объединить представленный комплекс машин в единую систему. Границы их применения очерчиваются лесозаготовительными участками независимо от территориальной принадлежности. Иными словами, предложенные разработки можно использовать на всей территории страны. Такая широта географии обусловлена классическими принципами в подходах к лесозаготовительному процессу и адаптируемости решений под реалии производств. Взаимосвязь всех представленных элементов описана далее. Научной новизной данной технологии является подготовка сырья в виде сортировки по видам порубочных остатков для дальнейшей переработки.

Для сбора, сортировки и транспортировки порубочных остатков используется изображенная на рис. 2 транспортно-сортировочная машина на базе

форвардера с модернизированным прицепом [12, 13]. Прицеп собирается из решетчатых металлических конструкций, которые с помощью крана-манипулятора форвардера монтируются на кониках прицепа.

Рис. 2. Модель модернизированного форвардера: 1 – базовая машина; 2 – грейферный захват с гильотинным ножом; 3 – модернизированный прицеп

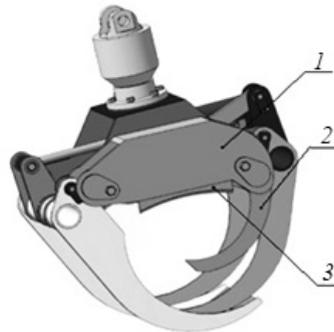
Fig. 2. The model of the upgraded forwarder: 1 – basic machine; 2 – clam with a guillotine knife; 3 – upgraded trailer



Уменьшение длины древесного сырья достигается применением механизма с гильотинным ножом (рис. 3), установленным на манипулятор форвардера. Разделение сучьев и веток осуществляется грейфером, при необходимости они разрезаются встроенными ножами. В отличие от других типов режущих инструментов (цепная, дисковая пила), использование гильотинного ножа оригинальной формы для разрезания данных порубочных остатков энергетически более эффективно.

Рис. 3. Модель грейферного захвата с гильотинным ножом: 1 – корпус; 2 – гильотинный нож; 3 – контрнож

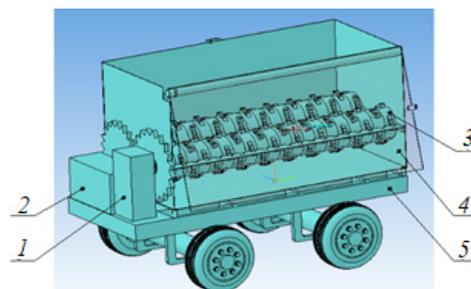
Fig. 3. The model of a clam with a guillotine knife: 1 – body; 2 – guillotine knife; 3 – counter-knife



Разделенные по породам и геометрическим размерам ветви, ветки и сучья поступают в показанную на рис. 4 мобильную окорочную машину [17]. Конструкция машины позволяет окоривать в условиях лесозаготовительных работ древесину в виде ветвей, веток и сучьев длиной до 2,5 м с заранее отделенной древесной зеленью. Принцип работы устройства заключается в том, что окорка сырья осуществляется за счет зубьев шайб оригинальной конструкции, установленных на вращающихся навстречу друг другу валах, и силы трения веток, ветвей и сучьев друг о друга и стенки корпуса устройства.

Рис. 4. Модель мобильной окорочной машины: 1 – редуктор; 2 – коробка отбора мощности; 3 – рабочие валы; 4 – корпус с откидным бортом; 5 – колесная база

Fig. 4. The model of a mobile debarker: 1 – gearbox; 2 – power take-off; 3 – working shafts; 4 – body with a folding side; 5 – wheelbase



При помощи мобильной рубительной машины окоренная древесина перерабатывается в технологическую щепу. Технологическая щепа направляется на мобильную линию по производству древесноволокнистого полуфабриката после размола в аэродинамической среде при помощи изображенной на рис. 5 роторно-ножевой установки [14, 16] с последующим отжимом и упаковыванием. Отличительная черта процесса обработки щепы заключается в том, что перед размолом она подвергается обработке водным раствором уксусной кислоты. Размол не в водной, как в традиционных машинах, а в аэродинамической среде обеспечивает особая конструкция ножей ротора и статора.

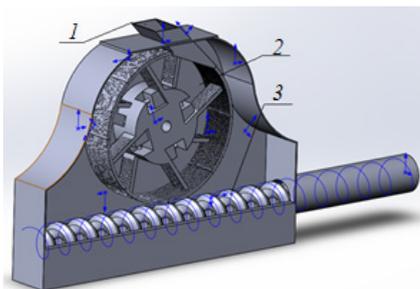


Рис. 5. Модель роторно-ножевой установки: 1 – загрузочный патрубок; 2 – рабочая камера; 3 – выносной шнек

Fig. 5. The model of a rotary knife plant: 1 – loading spout; 2 – working chamber; 3 – removable auger

Из древесной зелени хвойных пород в представленной на рис. 6 мобильной ножевой установке [15] производится хвойно-витаминная мука. Устройство, имея оригинальную конструкцию рабочих органов, в одном корпусе совмещает узлы отделения и измельчения древесной зелени. Узлы смонтированы на колесной базе, что позволяет получать хвойную муку в условиях лесосеки.

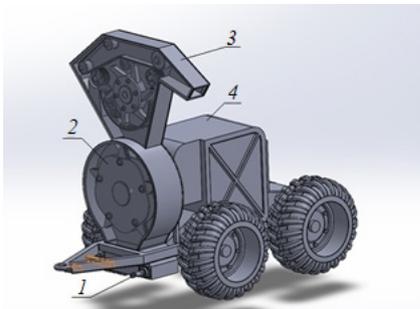


Рис. 6. Модель мобильной установки для производства хвойно-витаминной муки: 1 – приводной вал; 2 – модуль измельчения хвои; 3 – модуль отделения хвои; 4 – модуль вакуумного упаковывания

Fig. 6. The model of a mobile plant for the production of coniferous-vitamin flour: 1 – drive shaft; 2 – needle grinding module; 3 – needle separation module; 4 – vacuum packaging module

Сортированные ветки, ветви и сучья без древесной зелени подаются в мобильную ножевую установку для производства древесной муки (рис. 7).

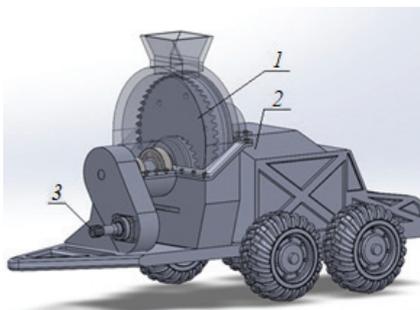


Рис. 7. Модель мобильной установки для производства древесной муки: 1 – рабочая камера; 2 – модуль вакуумного упаковывания; 3 – приводной вал

Fig. 7. The model of a mobile plant for the production of wood flour: 1 – working chamber; 2 – vacuum packaging module; 3 – drive shaft

Основная цель представленных технологических решений – увеличение доли перерабатываемого древесного сырья. Учитывая, что на лесосеке остается до

1/2 биомассы заготавливаемой древесины, использование предлагаемых разработок следует признать перспективным. При этом данный комплекс устройств позволяет решать экономические задачи, заключающиеся прежде всего в снижении стоимости транспортировки сырья и полуфабрикатов с лесной территории. Такой эффект достигается за счет измельчения сырья и увеличения плотности получаемых полуфабрикатов путем применения системы модернизированных машин. Вовлечение в производство даже незначительной части остающейся в настоящее время на лесосеке древесной биомассы будет способствовать повышению производственно-экономических показателей лесной отрасли. Также снизятся экологическая нагрузка на природные экосистемы и риски развития неблагоприятных ситуаций на лесосеках (пожары, вредители, болезни и т. д.).

Заключение

Таким образом, в ходе исследования разработаны научные основы эффективного использования биомассы дерева. Представлены итоги комплекса исследований в разрезе проектирования технологической схемы переработки биомассы дерева в различные продукты с учетом особенностей строения древесины. Для этих целей была проведена серия экспериментов, в т. ч. в направлении имитационного моделирования. Предложенные конструкции оборудования для переработки отходов лесозаготовок позволят увеличить долю полезно используемого древесного сырья. Внедрение описанных деревоперерабатывающих машин должно привести к росту доли заготавливаемого и перерабатываемого сырья с единицы площади, снизить экологическую нагрузку от лесозаготовительного процесса на окружающую среду, повысить эффективность отрасли в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреев А.А., Доспехова Н.А., Копарев В.С. Анализ технологических операций получения древесной щепы // Науч. журн. КубГАУ. 2012. № 81(07). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/29.pdf> (дата обращения: 15.06.24).
Andreev A.A., Dospekhnova N.A., Koparev V.S. Analysis of Technological Operations of Wooden Chips Manufacturing. *Nauchnyj zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU, 2012, no. 81(07). (In Russ.).
2. Бурносова А.Н. Использование биомассы дерева на примере лесозаготовительного предприятия // Севергеоэкотех-2013: сб. по материалам XIV междунар. молодеж. науч. конф.: в 5 ч. Ч. IV. Ухта: Ухтин. гос. техн. ун-т, 2013. С. 56–59.
Burnosova A.N. The Use of Wood Biomass by the Example of a Logging Enterprise. *Severgeoekotekh-2013: Materials of the XIV International Youth Scientific Conference: in 5 parts. Ukhta, Ukhta State Technical University, 2013, part IV, pp. 56–59.* (In Russ.).
3. Гнатовская И.В. К вопросу производства пилопродукции и технологической щепы из низкокачественной древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2003. № 5. С. 81–86.
Gnatovskaya I.V. On the Issue of Production of Lumber and Technological Chips from Low-Quality Wood. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2003, no. 5, pp. 81–86. (In Russ.).
4. Гомонай М.В. Технология переработки древесины. М.: МГУЛ, 2002. 232 с.
Gomonay M.V. *Wood Processing Technology*. Moscow, MSFU Publ., 2002. 232 p. (In Russ.).
5. Коробов В.В., Брик М.И., Рушинов Н.П. Комплексная переработка низкокачественной древесины и отходов лесозаготовок. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 271 с.

Korobov V.V., Brik M.I., Rushnov N.P. *Complex Processing of Low-Quality Wood and Logging Waste*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1978. 271 p. (In Russ.).

6. Коробов В.В., Рушинов Н.П. Комплексное использование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 87 с.

Korobov V.V., Rushnov N.P. *Complex Use of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ. 1981. 87 p. (In Russ.).

7. Коробов В.В., Рушинов Н.П. Переработка низкокачественного древесного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.

Korobov V.V., Rushnov N.P. *Processing of Low-Quality Wood Raw Materials (Problems of Waste-Free Technology)*. Moscow, Ecologia Publ., 1991. 288 p. (In Russ.).

8. Куницкая О.А., Григорьев И.В. Переработка низкотоварной древесины: проблемы и перспективы // Энергия: экономика, техника, экология. 2015. № 9. С. 70–75.

Kunitskaya O.A., Grigor'ev I.V. Processing of Low-Merchantable Wood: Problems and Prospects. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2015, no. 9, pp. 70–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/3998>

9. Куницкая О.А., Локиштанов Б.М., Григорьев И.В. Переработка низкотоварной древесины на технологическую щепу // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-2(8-2). С. 379–382.

Kunitskaya O.A., Lokshtanov B.M., Grigor'ev I.V. Processing of Low-Value Wood into Technological Chips. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice, 2014, vol. 2, no. 3-2(8-2), pp. 379–382. (In Russ.).

10. Михайлов Г.М., Серов Н.А. Пути улучшения использования вторичного древесного сырья. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 224 с.

Mikhailov G.M., Serov N.A. *Ways to Improve the Use of Recycled Wood Raw Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 224 p. (In Russ.).

11. Никушинов В.Д. Комплексное использование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 264 с.

Nikishov V.D. *Complex Use of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 264 p. (In Russ.).

12. Патент РФ 2624738. Способ сортировки порубочных остатков: № 2015149090: заявл. 16.11.2015: опубл. 06.07.2017 / А.П. Мохирев, М.А. Зырянов, Ю.А. Безруких.

Mokhirev A.P., Zyryanov M.A., Bezrukikh Yu.A. *Method for Sorting Logging Residues*. Patent RF no. RU 2624738 C, 2017. (In Russ.).

13. Патент РФ 167846. Прицеп форвардера: № 2015152472: заявл. 07.12.2015: опубл. 10.01.2017 / М.А. Зырянов, А.П. Мохирев.

Zyryanov M.A., Mokhirev A.P. *Forwarder Trailer*. Patent RF no. RU 167846 C1, 2017. (In Russ.).

14. Патент РФ 2673858. Устройство для размола щепы в аэродинамической среде: № 2017135882: заявл. 09.10.2017: опубл. 30.11.2018 / М.А. Зырянов, С.В. Сыромятников, И. Халматов, А.Н. Баранов.

Zyryanov M.A., Syromyatnikov S.V., Khalmatov I., Baranov A.N. *Device for Grinding Wood Chips in an Aerodynamic Environment*. Patent RF no. RU 2673858 C1, 2018. (In Russ.).

15. Патент РФ 2698059. Мобильное устройство для измельчения древесной зелени хвойных пород: № 2018120398: заявл. 01.06.2018: опубл. 21.08.2019 / М.А. Зырянов, К.В. Борин, В.И. Морозов, Н.А. Петрушева.

Zyryanov M.A., Borin K.V., Morozov V.I., Petrusheva N.A. *Mobile Device for Chopping Coniferous Wood*. Patent RF no. RU 2698059 C1, 2019. (In Russ.).

16. Патент РФ 2745866. Способ получения древесно-волокнистого полуфабриката: № 2020121427: заявл. 23.06.2020: опубл. 02.04.2021 / М.А. Зырянов, С.В. Сыромятников, С.О. Медведев, А.П. Мохирев.

Zyryanov M.A., Syromyatnikov S.V., Medvedev S.O., Mokhirev A.P. *Method for Producing Wood-Fiber Semi-Finished Product*. Patent RF no. RU 2745866 C1, 2021. (In Russ.).

17. Патент РФ 2804331. Мобильное устройство для окорки древесины: № 2023103272: заявл. 13.02.2023: опубл. 28.09.2023 / М.А. Зырянов, С.О. Медведев, С.О. Сергаев.

Zyryanov M.A., Medvedev S.O., Sergaev S.O. *Mobile Device for Debarking Wood*. Patent RF no. RU 2804331 C1, 2023. (In Russ.).

18. Рябухин П.Б., Ковалев А.П., Козорез А.П. К вопросу эффективности использования низкотоварной древесины // Вестн. ТОГУ. 2012. № 2(25). С. 101–106.

Ryabukhin P.B., Kovalev A.P., Kozorez A.P. On the Issue of Effective Use of Low-commercial Wood. *Vestnik TOGU = Bulletin of PNU*, 2012, no. 2(25), pp. 101–106. (In Russ.).

19. Усольцев В.А., Ципордей И.С., Часовских В.П. Модели для оценки биомассы деревьев лесобразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. XLI, № 4. С. 300–305.

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P. Models for Estimating Biomass of Forest-Forming Species by Crown Diameter as Related to Drone Involving. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2023, vol. XLI, no. 4, pp. 300–305. (In Russ.).

20. Цыгарова М.В. К вопросу о переработке порубочных остатков при заготовке древесины // Вестн. Нижегород. гос. с.-х. акад. 2014. Т. 4. С. 290–293.

Tsygarova M.V. On the Issue of Processing Logging Residues during Timber Harvesting. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyajstvennoy akademii = Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, 2014, vol. 4, pp. 290–293. (In Russ.).

21. Шегельман И.Р. Обоснование технологических и технических решений для перспективных технологических процессов подготовки биомассы дерева к переработке на щепу: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1997. 261 с.

Shegel'man I.R. Justification of Technological and Technical Solutions for Promising Technological Processes for Preparing Wood Biomass for Processing into Wood Chips: Doc. Eng. Sci. Diss. St. Petersburg, 1997. 261 p. (In Russ.).

22. Ariko Y.S., Kononovich D.A., Voinash S.A., Sokolova V.A., Polyanskaya O.A., Garbuzova T.G., Andronov A.V. Selection of Parameters of Machines for Collection of Logging Waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 839, art. no. 052019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052019>

23. Gryazkin A.V., Beliaev V.V., Beliaeva N.V., Petrik V.V., Kuznetsov E.N., Shakhov A.G. The Logging Waste as Inexhaustible Resource for Alternative Energy. *Thermal Science*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 1135–1142. <https://doi.org/10.2298/TSCI150306047G>

24. Larchenko Y.G., Shusharina G.A., Tretyakov A.V. State and Prospects of Logging and Sawmilling Waste Management in Khabarovsk Territory. *Business 4.0 as a Subject of the Digital Economy. Advances in Science, Technology & Innovation*, 2022, pp. 887–892. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90324-4_145

25. Pinchevska O., Lakyda Y., Baranova O., Biletskyi M., Holovach V., Oliinyk R., Yeroshenko A. Designing a New Wood-Composite Material Made from Logging Waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 4, no. 1(106), pp. 91–97. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209130>

26. Vititnev A., Alashkevich Yu., Marchenko R., Zyryanov M., Mokhirev A. Use of Logging Waste in Technologies for Deep Chemical Processing of Wood. *Wood Research*, 2021, vol. 66, no. 5, pp. 821–832. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.5.821832>

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