

DOI:10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Основан в 1833 г.

4

2023

Уважаемые читатели, авторы, рецензенты, члены редакционной коллегии!

К сведению авторов

В журнале публикуются ранее не публиковавшиеся научные статьи, не содержащие сведений, относящихся к государственной, служебной или коммерческой тайне. Все статьи подлежат обязательному анонимному рецензированию. Отклоненные статьи авторам не возвращаются. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и вносить редакционные изменения в рукопись. Плата за публикацию рукописей не взимается, авторский гонорар не выплачивается.

Основные требования, предъявляемые к статьям:

научная новизна; актуальность задачи, решаемой данным исследованием; корректность постановки эксперимента и полученных результатов; возможность воспроизведения экспериментальных данных; ясность и логичность изложения; правильное оформление рукописи. Объем статьи не должен превышать 20 страниц (обзорная статья 25–30 страниц) формата А4, включая таблицы, схемы, рисунки и список литературы. Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word, шрифт 14 Times New Roman, межстрочный интервал – множитель 1,2, поля – 2 см. Иллюстрации представляются в форматах Tiff или Jpg, графики в Excel с разрешением не менее 300 dpi. Все обозначения (цифровые и буквенные) на рисунках и графиках должны быть выполнены шрифтом Times New Roman. Формулы набираются в Word for Windows. Нумеруются только те формулы, на которые делаются ссылки в тексте. Порядковый номер ставится в круглых скобках справа от формулы.

Материал статьи должен быть ясно изложен и содержать: тип статьи; код УДК; название статьи; фамилия и инициалы автора(ов); ученая степень/звание автора(ов); цифровые идентификаторы автора (необходима регистрация); название организации, в которой выполнена работа (с полным почтовым адресом); адреса электронной почты всех авторов; аннотация; ключевые слова; метаданные на английском языке в том же порядке, как и в варианте на русском языке; текст статьи (разделы: введение, объекты и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение (выводы)); список литературы.

Аннотация включает: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты; область применения результатов; выводы. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Объем аннотации от 250 до 300 слов.

Ключевые слова (до 10 слов) – это слова из текста, по которым может вестись оценка и поиск статьи. В качестве ключевых слов могут использоваться как слова, так и словосочетания.

Список литературы оформляется согласно требованиям ГОСТ 7.0.5–2008, составляется в алфавитном порядке (сначала отечественные, затем зарубежные авторы). Перевод на английский язык русскоязычных источников оформляется сразу после русскоязычного написания. Библиографические ссылки в тексте статьи на номер литературного источника делаются в квадратных скобках, номер указывает на источник в списке литературы. В статье рекомендуется использовать не менее 20 источников (для научного обзора – не менее 50–80), 70 % из которых опубликованы не ранее 2000 г., в том числе 30–40 % из которых иностранные.

Более подробная информация размещена на сайте <http://lesnoizhurnal.ru>



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

2023

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)

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
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)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
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)
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

2023

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)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
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)
Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
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)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov, N.A. Babich, V.A. Bryntsev.* Differentiation of Plus Trees of Scots Pine by Xylem Conditions..... 9
- С.В. Ребко, П.Г. Мельник, А.В. Козел, Л.Ф. Поплавская, П.В. Тупик, В.В. Носников.* Сравнительная оценка физико-механических свойств древесины различных климатипов сосны обыкновенной..... 26
- Л.Г. Исаева, В.В. Ершов, Г.П. Урбанавичюс, Е.А. Боровичев.* Интродукция кедра и лиственницы в условиях Кольского Заполярья..... 41
- С.Н. Тарханов, Е.А. Пинаевская, Ю.Е. Аганина, А.С. Пахов.* Изменчивость биохимических признаков *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при адаптации форм в условиях избыточного увлажнения..... 58
- Т.А. Турчина, О.А. Банникова.* Создание лесных культур сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) на бугристых песках в степной зоне России..... 76
- В.Ю. Острошенко, Л.Ю. Острошенко.* Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).... 93
- А.Е. Кухта, О.В. Максимова, В.В. Кузнецова.* Воздействие климатических факторов на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на побережье Кандалакшского залива Белого моря..... 105

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- А.В. Макаренко.* Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке..... 120

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- Г.Ф. Прокофьев, О.Л. Коваленко.* Усталостная прочность ленточных пил... 136
- В.И. Мелехов, И.И. Соловьев.* Формирование секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы..... 146

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

- А.Е. Шкуро, В.В. Глухих, К.А. Усова, Д.Д. Чирков, П.С. Захаров, А.В. Вураско.* Получение биокомпозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы с различной степенью ацетилирования.... 155
- А.А. Пенкин, Я.В. Казаков.* Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи..... 169

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- А.В. Грязькин, Д.А. Данилов, Д.А. Зайцев, Минь Ань Хоанг, Чан Чунг Тхань.* Регуляция соковыделения при подсочке березы *Betula pendula* Roth..... 180
- Е.М. Царев, К.П. Рукомойников, С.Е. Анисимов, Т.А. Колюхова, А.В. Кременев.* Совершенствование технологии химического ухода в лесонасаждениях..... 190
- С.А. Коньшакова, Н.А. Булхов, А.Н. Заикин, С.Г. Кузнецов, В.В. Сиваков.* Оценка перспектив развития предприятий лесного хозяйства Республики Башкортостан..... 202
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov, N.A. Babich, V.A. Bryntsev.</i> Differentiation of Plus Trees of Scots Pine by Xylem Conditions.....	9
<i>S.U. Rabko, P.G. Melnik, A.V. Kozel, L.F. Paplauskaya, P.V. Tupik, V.V. Nosnikau.</i> Comparison of Physical and Mechanical Properties of Scots Pine Wood Grown in Different Climates.....	26
<i>L.G. Isaeva, V.V. Ershov, G.P. Urbanavichus, E.A. Borovichev.</i> Introduced Species of Cedar and Larch in the Climate Conditions of the Kola Arctic Region.....	41
<i>S.N. Tarkhanov, E.A. Pinaevskaya, Y.E. Aganina, A.S. Pakhov.</i> Variability of Biochemical Properties During Adaptation of <i>Pinus sylvestris</i> (Pinaceae) Forms to Excessive Moisture Conditions.....	58
<i>T.A. Turchina, O.A. Bannikova.</i> Creation of Forest Cultures of Crimean Pine (<i>Pinus pallasiana</i> D. Don) on the Hilly Sands in the Steppe Zone of Russia.....	76
<i>V.Yu. Ostroshenko, L.Yu. Ostroshenko.</i> Influence of Growth Stimulants on Seed Germination and Seedlings Growth of Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.).....	93
<i>A.E. Koukhtha, O.V. Maksimova, V.V. Kuznetsova.</i> Influence of Climatic Factors on Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) Growth on the Coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea.....	105

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>A.V. Makarenko.</i> Effective Positioning in Cutting Area of a Harvester Using Computer Modelling.....	120
---	-----

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>G.F. Prokofiev, O.L. Kovalenko.</i> Fatigue Strength of Band Saws.....	136
<i>V.I. Melekhov, I.I. Solovev.</i> Formation of Sectoral Residual Thermoplastic Tension Fields in Circular Saw Blade.....	146

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

- A.E. Shkuro, V.V. Glukhikh, K.A. Usova, D.D. Chirkov, P.S. Zakharov, A.V. Vurasko.* Deriving Biocomposites of Polymer Phase Plasticised Cellulose Acetates with Varying Degrees of Acetylation..... 155
- A.A. Penkin, Y.V. Kazakov.* Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of the Recycled Pulp. Part 2. Fines Characteristics..... 169

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- A.V. Gryazkin, D.A. Danilov, D.A. Zaytsev, Minh Anh Hoang, Tran Trung Thanh.* Regulation of Sap Release when Tapping *Betula pendula* Roth..... 180
- E.M. Tsarev, K.P. Rukomojnikov, S.E. Anisimov, T.A. Konyukhova, A.V. Krenev.* Improving Chemical Maintenance Techniques in Forest Plantations..... 190
- S.A. Konshakova, N.A. Bulkhov, A.N. Zaikin, S.G. Kuznetsov, V.V. Sivakov.* Assessment of the Development Potential of Forestry Enterprises of the Republic of Bashkortostan..... 202
-



Original article

УДК 630*165.6+630*232.311.3+630*232.12:582.475.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-9-25

Differentiation of Plus Trees of Scots Pine by Xylem Conditions

Nataliya N. Besschetnova¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

Vladimir P. Besschetnov¹ ✉, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

Nikolay A. Babich², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

Vladimir A. Bryntsev³, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

¹Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagrina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru ✉

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; forest@narfu.ru

³Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, ul. Botanicheskaya, 4, Moscow, 127276, Russian Federation; bryntsev@mail.ru

Received on January 12, 2022 / Approved after reviewing on April 26, 2022 / Accepted on April 30, 2022

Abstract. An essential stage in the establishment of seed orchards is the formation of an optimal composition, avoiding inbreeding depression in the produced seed material, which develops as a result of crossbreeding between closely related plus trees. The negative effect can be reduced by ensuring the genetic heterogeneity of the seeds. The purpose of this study is to give a relative evaluation of the plus trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as one of the most economically significant tree species on the European continent according to their physiological conditions. The formation and lignification of the xylem of the plus trees were investigated in the Nizhny Novgorod region of Russia. A histochemical examination was performed using the reaction of phloroglucinol to lignin. Phenotypic differences in the physiological conditions of plus trees appeared on a uniform ecological background that indicates their genotypic determinism. This fact was confirmed by ANOVA. The share of the influence of differences between the proper plus trees was between 25.16±8.91 % and 53.98±5.48 %. According to the results of the factor and cluster analysis, the association of plus trees was generated by the similarity of the multidimensional estimates of the xylem conditions. The objects that were statistically most distant from the others were determined. The hereditary conditionality of the identified differences among plus trees allows us to consider their grouping into clusters as genotypically determined. This information provides a reasonable approach to the formation of an assortment of Scots pine clonal seed orchards.

Keywords: Scots pine, plus trees, clones, inbreeding depression, xylem, lignification, hereditary conditionality



Acknowledgments: The research was V.A. Bryntsev carried out within the framework of the state assignment of Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences on topic No. 22042700002-6.

For citation: Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of Plus Trees of Scots Pine by Xylem Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 9–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-9-25>

Научная статья

Дифференциация плюсовых деревьев сосны обыкновенной по состоянию ксилемы

Н.Н. Бессчетнова¹, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

В.П. Бессчетнов^{1✉}, *д-р биол. наук, проф.*; *ResearcherID*: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

Н.А. Бабич², *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID*: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

В.А. Брынецв³, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID*: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

¹Нижегородский государственный агротехнологический университет, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru✉

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; forest@narfu.ru

³Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, ул. Ботаническая, д. 4, Москва, Россия, 127276; bryntsev@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.22 / Одобрена после рецензирования 26.04.22 / Принята к печати 30.04.22

Аннотация. Важным моментом при создании лесосеменных плантаций является формирование их оптимального состава, позволяющего избежать проявлений инбредной депрессии получаемого на них семенного материала, которая возникает вследствие скрещивания между близкородственными плюсовыми деревьями. Этот негативный эффект можно снизить путем обеспечения наследственной гетерогенности материала для создания лесосеменных плантаций. Цель работы – дать сравнительную оценку плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как одной из наиболее значимых в хозяйственном плане древесных пород на Европейском континенте по их физиологическому состоянию. Изучено образование и одревеснение ксилемы плюсовых деревьев, выделенных в Нижегородской области России. Проведено гистохимическое исследование с использованием реакции флороглюцина на лигнин. Фенотипические различия в физиологическом состоянии плюсовых деревьев проявились на выровненном экологическом фоне, что указывает на их генотипический детерминизм. Данный факт подтвержден дисперсионным анализом. Доля влияния различий между собственно плюсовыми деревьями составила от 25,16±8,91 до 53,98±5,48 %. По результатам факторного и кластерного анализа выполнено объединение плюсовых деревьев на основе сходства по всему комплексу оценок состояния ксилемы. Идентифицированы объекты, статисти-

чески наиболее удаленные от остальных в многомерном пространстве признаков. Наследственный характер различий, установленных между плюсовыми деревьями, позволяет рассматривать их группирование по кластерам как генотипически обусловленное. Результаты исследования дают возможность обоснованно подходить к формированию ассортимента клоновых лесосеменных плантаций сосны обыкновенной.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, плюсовые деревья, клоны, инбредная депрессия, ксилема, одревеснение, наследственная обусловленность

Благодарности: Работа В.А. Брынцева выполнена в рамках государственного задания ГБС РАН по теме № 122042700002-6.

Для цитирования: Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of Plus Trees of Scots Pine by Xylem Conditions // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 9–25. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-9-25>

Introduction

The production of a balanced composition of the vegetative offspring of plus trees on clonal seed orchards (CSO) of the first order is one of the challenges in contemporary forest selection [8, 27, 31, 33, 48]. This problem is related in many ways to the risk of the occurrence of inbreeding depression in the seed progeny of plus trees in seed orchards [2, 27, 31]. According to some estimates, its effect can vary from 26 % to 65 % [18], while other studies have considered it as 28.6 % and 59.3 % [23]. Therefore, it is necessary to avoid closely related crossbreeding. They occur for 10–20 % of coniferous trees, more frequently in CSO than in natural plantings. Therefore, they are the primary source of inbreeding [26]. However, another informational source [35] indicates that the rate of self-pollination in CSO is 4 %. Thus, it is important to provide enough clones in seed-bearing plantations [22, 23]. Nevertheless, it is a fact that plus selection based on mass selection by phenotype of the best species of natural populations remains still the most effective strategy for the selective improvement of forests in many countries [8, 23, 58]. Although the issue of plus trees selection effectiveness has been discussed for a long time in literature, some tasks are still waiting for final solutions, requiring comprehensive answers to some questions arising from practice [23, 36, 37, 54–56].

It is currently widely accepted to use histochemical examination as a method to identify the biological characteristics and diversity of woody plants [4–6, 12, 29, 30]. Indicators of the plant physiological state determine the adaptability of the organism to the environment [44], the resistance to drought and xylem embolism [16], the success of xylogenesis [14, 45], the survival of the progeny [15], the biological potential for reproductive activity [29, 30], and regeneration ability [46]. The state and rate of the development of xylem in woody plants, the xylem cell formation and lignification processes, the ratio between the formation of early and late wood, as well as their hereditary conditionality are the subjects of systematic, comprehensive studies [16, 29, 30]. These aspects are of particular importance in relation to native tree species, which play an important role in the formation of forest resource potential. Among them is the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), which is a dominant species in forestry not only in Russia [7–9, 47], but also in many European countries, where it is constantly at the center of attention of the researchers [3, 4, 6, 10, 16, 44]. In the studies of Scots pine polymorphism, the solution to the problems associated with plus selection of this biological species is the establishment of seed orchards and

an increase in effectiveness. They are the subjects of numerous scientific studies conducted over a long period of time [26, 27, 36–38, 50, 51]. In this context, the solved scientific-theoretical and practical (economic) problem can be presented as overcoming the negative effect of inbreeding depression on the seed progeny of plus trees. Consequently, the purpose of our work is to conduct a comparative assessment of the plus trees of the Scots pine in relation to the formation and lignification of the xylem of annual shoots.

Object and methods

The object of the study was 21 plus trees of Scots pine, which were isolated from natural stands in the Nizhny Novgorod region of the Russian Federation using mass selection methods generally accepted in forestry breeding. Their vegetative progeny was cultivated in a clone archive (collection for *in situ* conservation) located in the same region. Formally, it is a part of the Semenovskiy Spetssemleskhoz State Budgetary Institution of the Nizhny Novgorod Region (a dedicated company producing forest seeds and planting material). Each plus tree (ortet) in the clonal archive was represented by 6–23 grafted seedlings (ramets). The total number was 320 pcs. They were arranged in rows on a rectangular pattern of 3×6 m. The location of the experimental site was 56°44'20" N and 44°20'59" E. This clone archive was formed in 1980 by planting 3-year-old seedlings generated through grafting of plus tree cuttings onto well-developed 2-year-old seedling rootstocks, which had been cultivated in an open ground forest nursery of the Semenovskiy Spetssemleskhoz. The trial plot was 1.6 ha. The properties of the soil, such as fertility, mechanical composition, and moisture conditions, in this plot were typical of forest areas in the Central Zone of the European part of Russia.

The studies were carried out through field stationery and laboratory methods, using such schemes as work organization and sampling construction, which allowed for the implementation of the principles of the only logical distinction, reliability, suitability, and expediency of experience. The elimination of the differentiating influence of environmental factors was achieved by comparisons of the studied objects and samples (plants and their shoots), which were carried out only within the boundaries of one experimental site, on which uniform schemes, with respect to seating and plant feeding areas, were maintained. A single regime for maintenance and cultivation was supported, and the uniformity of the initial planting material (the same type of three-year-old grafted saplings) used for the creation of the clone archive was provided. The same silvicultural and agrotechnical measures were carried out. As a result, the experience in each of the work blocks was organized under the conditions of the aligned ecological background. The rows of clones were placed in their archives in accordance with the applicable regulations regarding the creation of objects with a constant forest seed base and a single genetic breeding complex. In particular, a randomized placement of rows in the plot was provided. This eliminated the targeted provision of any of the progenies of plus trees, including benefits in terms of growth and the formation of the plants, their shoots, and in the end, their physiological characteristics. The elimination of time factor influence, causing chronographic (phenological and ontogenetic) variability of the analyzed characteristics of the studied plants, was achieved by the simultaneous harvesting of biological samples, simultaneous measurements, observation, and accounting

of the analyzed parameters, and comparison of only same-age trees and their parts. In practice, this condition was achieved by simultaneous planting and by using the same age of planting material in the creation of such objects. Thus, the minimization of the influence of background factors on the phenotypic manifestation of physiological differences between plants allowed us to explain the presence of such differences as being due to the action of the hereditary specificity of the studied objects in relation to the analyzed features. The correctness of the procurement of the initial material was provided by a preliminary audit of the assortment structure of the surveyed archives of clones, during which the identification of each registration tree (ramet) was carried out, and it was established that they each belonged to a clone of a concrete plus tree (ortet).

The primary unit of a sample in the histochemical experience was represented by temporary preparations of cross-sectional cuts from the average part of the annual growth, which were analyzed using a light microscope (Mikmed-2) after staining and fixation. The magnification was 10×20 . The lignification of cellulose in the xylem cell walls was assessed using the traditionally applied qualitative reactions of phloroglucinol to lignin: a 10 % solution of phloroglucinol in 95 % ethanol with a few drops of hydrochloric acid. As a sighting control, we used slices that were not affected by the test reagents. The color of their xylem cells corresponded to the absence of lignification [4, 32]. The number of formed cells in each accounting zone of the xylem was counted along not less than 3 radial files (transects). These slices were compared to the slices treated with appropriate reagents and placed on the following scale: 0 – no staining, no differences between the state of the painted slices and that of the control slices; 1 – weakly expressed pale pink coloration; 2 – well-fixed pale pink coloring; 3 – medium-intensity pink coloring; 4 – saturated pink coloration with an above-average intensity but not reaching the maximum; and 5 – maximum intensity bright crimson coloration [4, 32]. For each zone separately, we counted the number of rows of cells by transects in the radial direction, from the first row in the early xylem to the last visible row of the late xylem before the cambium. The degree of xylem lignification was expressed as a percentage of the total number of rows of its cells. The ratio of early and late xylem zones was estimated by the balance of the number of cell rows in each of them at the end of the vegetation period, when all cells of late xylem underwent lignification. To construct an integral assessment of the state of xylem, we considered indicators that determine the degree of its development and the level of lignification in the observed sight sector, covering all accounting zones from the core to the cambium [4, 32]:

the total number of rows of xylem cells formed at the time of accounting, which was determined by counting all rows of xylem cells in radial direct, regardless of the fact and degree of their lignification (feature 1);

the number of rows of completely lignified early xylem cells, which was determined by counting the rows of cells in the walls in which the process of lignification was fully completed, as confirmed by their uniform intense color, corresponding to an assessment of 5 points (feature 2);

the number of rows of absolutely non-lignified xylem cells, determined by counting only those cells in the walls in which the signs of lignification were not fixed and there was no staining (i.e., assessment of 0 points) (feature 3);

the number of rows of partially lignified xylem cells, determined by counting only those cells in which the process of wall lignification was fixed but not completely, as confirmed by their uniform color of different intensities from 1 to 4 points (feature 4);

the depth of the lignification of xylem cells, taking into account the coefficient of their lignification grading, determined as the sum of the products of the number of cell rows in a separate accounting of each zone of xylem, on their lignification score (from 0 to 5 points), carried to the maximum assessment (5 points). This was expressed as the number of rows of xylem cells, corrected for the degree of lignification (feature 5);

the absolute percentage of the lignification of xylem cells, which was determined as a percentage share of lignified xylem cells, in varying degrees (from 1 to 5 points), relative to their total number (feature 6);

the relative percentage of xylem cell lignification, determined as a percentage share of fully and partially lignified xylem cells, the number of which was adjusted to the degree of their lignification (feature 7);

the total sum of rows of the fully lignified (5 points) cells of early and late xylem (feature 8).

In order to obtain clear information concerning the importance of the actual analysis of the dynamics of plant physiological indicators and comparatively assess them, a static indicator fixed to the observation date was used. The sampling times were confined to the characteristic phenological plant states: the period of rest (the first period of accounting), the exit from the state of rest (the second period of accounting), the beginning of the formation of late xylem (the third period of accounting), the transition to the state of rest (the fourth period of accounting). In addition, we took into account the fundamental possibility of involving the number of analyzed parameters in multidimensional analysis in addition to the signs of direct accounting and the signs derived from them. The above signs were recorded at each seasonal accounting, at the same time, in January (the first accounting period), sign 8 did not appear since, by the indicated moment, the early xylem of the current year had not yet been formed. For this reason, only the most informative signs recorded in all phases of seasonal plant development are left in Table 1. This approach is traditional in the organization of forestry and biological research, including those conducted by methods of histochemical analysis [1–3, 7–11, 32].

The actual material obtained in the course of the studies was processed statistically using one-way ANOVA according to Snedekor's algorithm with a Tukey pairwise test. In addition, according to generally accepted algorithms, phenotypic means, standard deviation, and coefficients of variation for all studied features of each plus tree were calculated. Complex estimates of the relative genetic proximity or distance of the compared objects were obtained in the course of principal component analysis (PCA) [17] and cluster analysis [53]. These techniques are actively used in the study of tree species [52], including histochemical [3, 8, 32] and forestry studies [43, 52, 53], the estimate of primary roundwood production [28], the comparative assessment of plus trees [24, 25], including the clonal analysis of their reproductive parameters [7, 50], population genetics [59], and the determination of genetic proximity [26]. An obligatory condition of the experiment was accepted, according to which it was ensured that all plus trees had the same set of quantitative characteristics, the number of which determined the dimension of Euclidean space. Clones that did not have at least one of the characteristics or did not receive reliable estimates during the preliminary statistical processing were excluded from the scheme. The accepted order of the formation of numerical arrays

made it possible to calculate the correlation and covariance estimates of each of the characteristics with all other object features in a multidimensional comparison complex. Amendments to the unevenness of complexes were not entered since the accounting of all parameters of the multidimensional objects in the surveyed site had the same number. In the calculations, we included the standardized values of the initial parameters, obtained by the z-transformation and based on the ratio of the deviation of the characteristic value from its average value to the corresponding standard deviation. As a result, a matrix of the normalized values of the features was obtained, which served as the basis for calculating the generalized statistical distances in Euclidean space. This approach yielded uniform and dimensionless characteristics, allowing the comparison of the object coordinates in the multidimensional feature space. The cluster analysis method was an ascending hierarchical procedure. The square of the Euclidean distance was used as a metric, and the agglomeration was considered the average linkage between groups.

Results and discussion

An assessment of the physiological condition of the plus trees in the examined clone archive, considering a wide range of features describing the level of xylem development and the degree of cell lignification in the tissues of annual shoots, revealed a noticeable differentiation in the composition of the analyzed clone archive (Table 1). Since the identified phenotypic differences between the plus trees appeared in the unified environmental conditions, there is a reason to believe that the source of their occurrence is primarily genetic. Statistical confirmation was provided by analysis of variance, in which the actual value of Fisher's F-criteria for most features exceeded the minimum acceptable limit at 5 % and 1 % significant levels. Significant differences failed to be confirmed in only two cases for features 4 and 5. We validated the effect of the differences between the actual plus trees (ortets), which in such cases is considered the coefficient of heritability in its wide meaning, on signs concerning the essentiality of the differences. This effect ranged from 16.85 ± 9.90 % for feature 1 to 49.59 ± 6.00 % for feature 2, with a general background of phenotypic differences.

The statistical reliability of the obtained results and the presented evidence of the hereditary conditionality of the revealed phenotypic diversity of plus trees with respect to the physiological state of the xylem of their annual shoots created sufficient ground for conducting multivariate analyses. In the factor analysis (PCA), these characteristics were grouped according to the principal components. The results of this transformation are reflected in Fig. 1 and in Table 2.

Figure 1 displays the extraction of the principal components and indicates quite a satisfactory outcome of this variant of the transformation factor. The distribution of analyzed variables (values of investigated features) is clearly visible, systematic, and logical (Table 2). Note that features 4 and 5, as well as features 6 and 7, were always a part of the same components. In the formation of the principal components, feature 1 always participated in combination with feature 8, and feature 3 with features 6 and 7. At the same time, some specificity in the structure of the principal components was revealed on each of the observation dates. Note that the information on feature 2 in the first term of registration is not presented due to the absence of the number of rows of fully lignified cells of early xylem formed in the current year at the time of registration of the actual indicator. The general tendency in the procedure of extracting the principal components was, for all accounting periods, a convincing exclusion of insignificant values close to 0 (Fig. 1).

Table 1

Average values of indicators of the physiological status of plus trees

Plus trees, No	Feature of xylem state (M±m)						
	1	2	3	4	5	6	7
14	24.33±2.19	21.78±2.27	1.67±0.17	0.89±0.31	0.60±0.21	92.34±1.34	91.04±1.58
3	22.11±1.18	20.33±1.05	0.78±0.15	1.00±0.29	0.71±0.20	96.44±0.72	95.21±0.58
19	29.56±1.25	27.56±1.21	1.00±0.00	1.00±0.29	0.73±0.22	96.56±0.18	95.67±0.33
6	37.89±1.80	35.56±1.67	1.00±0.00	1.33±0.24	0.91±0.18	97.31±0.14	96.21±0.21
22	21.78±0.92	19.89±0.89	1.00±0.00	0.89±0.26	0.60±0.16	95.34±0.20	94.02±0.50
1	30.44±2.68	28.56±2.61	1.11±0.11	0.78±0.28	0.56±0.20	96.13±0.46	95.46±0.45
5	19.78±1.66	18.11±1.60	1.11±0.11	0.56±0.24	0.40±0.19	94.17±0.56	93.38±0.56
17	43.56±4.61	41.11±4.46	1.33±0.17	1.11±0.26	0.78±0.20	96.85±0.33	96.04±0.36
18	31.67±1.00	29.67±0.94	1.00±0.17	1.00±0.29	0.78±0.26	96.83±0.51	96.10±0.48
40	23.33±0.80	21.44±0.91	1.00±0.00	0.89±0.31	0.67±0.25	95.68±0.14	94.71±0.35
41	34.56±1.16	32.33±1.25	1.00±0.00	1.22±0.28	0.93±0.23	97.08±0.09	96.22±0.24
45	22.78±1.02	21.00±1.09	0.89±0.11	0.89±0.26	0.60±0.19	95.93±0.52	94.68±0.64
47	24.78±2.41	22.56±2.33	1.00±0.00	1.22±0.22	0.87±0.17	95.70±0.36	94.25±0.50
29	31.78±2.34	29.44±2.29	1.33±0.17	1.00±0.24	0.73±0.17	95.72±0.49	94.89±0.64
49	23.78±3.14	21.67±3.12	1.00±0.00	1.11±0.26	0.87±0.24	95.23±0.57	93.98±0.86
39	21.00±0.82	19.00±1.11	1.00±0.00	1.00±0.37	0.78±0.31	95.18±0.18	94.04±0.65
21	32.56±2.10	30.44±1.82	1.11±0.11	1.00±0.33	0.73±0.26	96.53±0.30	95.79±0.24
20	21.44±1.33	19.33±1.25	1.00±0.17	1.11±0.31	0.80±0.22	95.07±1.03	93.72±0.98
30	31.00±1.40	28.78±1.30	1.00±0.17	1.22±0.22	0.87±0.15	96.77±0.48	95.64±0.36
42	34.22±3.02	31.89±2.77	1.11±0.11	1.22±0.55	0.91±0.43	96.60±0.33	95.70±0.61
44	27.56±1.26	25.56±1.31	0.89±0.11	1.11±0.26	0.69±0.15	96.74±0.44	95.11±0.86
Total	28.09±0.62	26.00±0.60	1.06±0.03	1.03±0.06	0.74±0.05	95.91±0.14	94.85±0.16

Note: The most informative characteristics (features 1–7) are used. Abbreviations of the features are used as specified in the Methods section. M – the average of the feature; ± m – error of the representativeness of the sample mean.

Table 2

Structure of the principal components of xylem state of plus trees by the accounting periods

Signs and indicators	Principal components of the accounting period								
	the first period		the second period			the third period			
	first	second	first	second	third	first	second	third	
Feature 1	0.944	–	–	–	0.793	0.962	–	–	
Feature 2	–	–	–0.794	–	–	0.966	–	–	
Feature 3	–	–0.972	–	0.847	–	–	–	–0.931	
Feature 4	0.982	–	0.864	–	–	–	0.936	–	
Feature 5	0.989	–	0.962	–	–	–	0.939	–	
Feature 6	–	0.986	–	–0.838	–	–	–	0.763	
Feature 7	–	0.980	–	0.684	–	–	–	0.713	
Feature 8	0.980	–	–	–	0.721	0.966	–	–	
Initial eigenvalues of principal components									
Value	3.9214	2.9845	3.5994	1.6475	1.1740	5.0405	1.7811	1.0901	
The share of the variance of principal components, %									
Dispersion	56.020	42.635	44.992	20.594	14.675	63.007	22.264	13.627	
Cumulative variance of principal components, %									
Dispersion	98.655		80.261			98.897			

Note: The rotated components of factor analysis are presented herein.

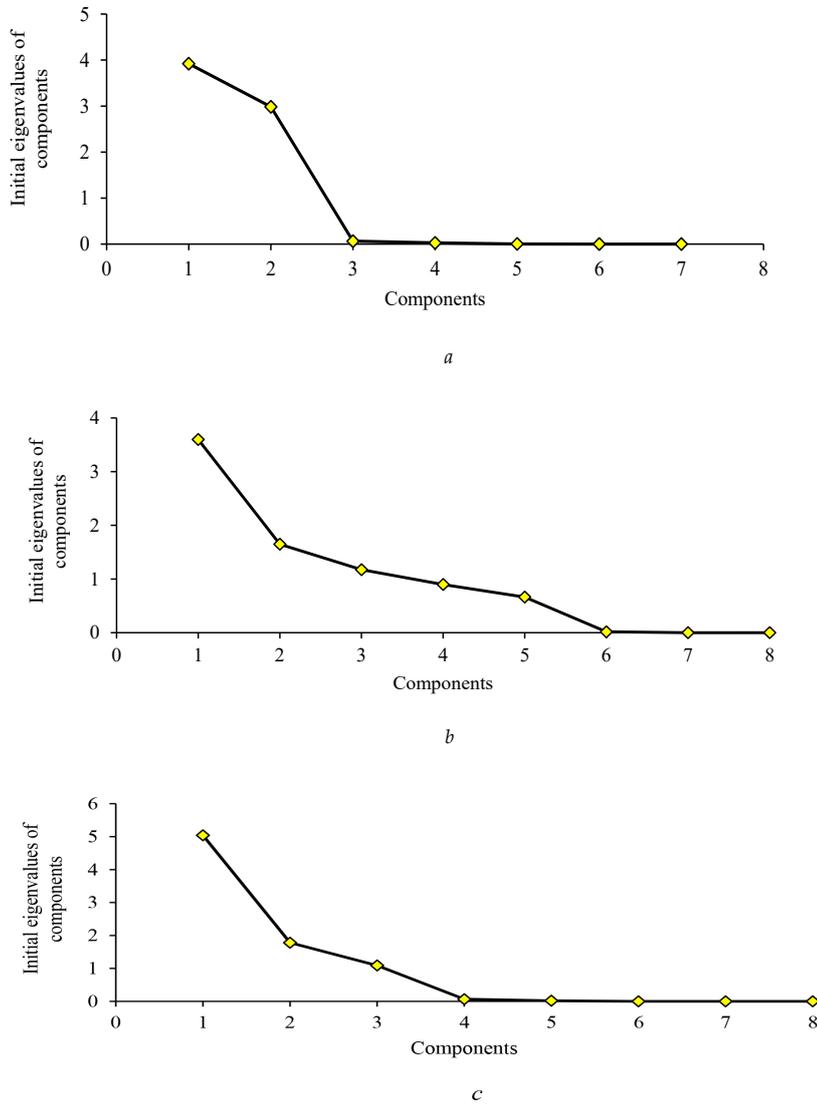


Fig. 1. Initial eigenvalues of the components with respect to the timeframes for measuring the plus tree xylem states: *a* – January; *b* – April; *c* – July

The sufficient stability and uniformity in the formation of the principal components in terms of timeframes for measuring the seasonal states of xylem during the year made it possible to perform a factor analysis (PCA) on a summary data set (Table 3, Fig. 2). It contains 23 features: 7 in the first accounting period and 8 in the second and third periods, respectively.

Figure 2 illustrates the allocation of six major components from the entire list of characteristics. The information provided in Table 3 demonstrates their structure, in which the distribution of the variables under consideration is determined, mostly seasonally, by the independent factors (principal components). The material attained at this stage of the work created an opportunity to perform a cluster analysis with the use of both normalized values of the original features (Table 4, Fig. 3) and the principal components derived on their basis (Table 5, Fig. 4).

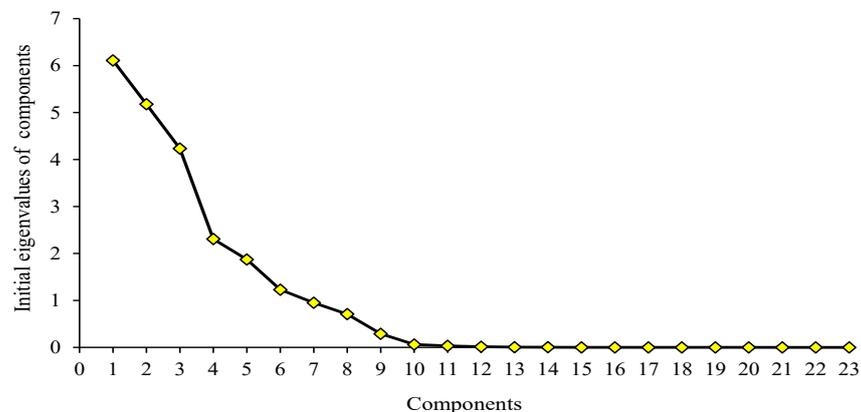


Fig. 2. Initial eigenvalues of the components for all accounting periods of the seasonal state of xylem in the shoots of plus trees

Table 3

Structure of the principal components for all accounting periods

Signs and indicators	Principal components of factor analysis on the seasonal state of xylem					
	first	second	third	fourth	fifth	sixth
Feature 1	–	0.9317	–	–	–	–
Feature 2	–	–	–	–0.9550	–	–
Feature 3	–	0.9736	–	–	–	–
Feature 4	–	0.9786	–	–	–	–
Feature 5	–	–	–	0.9641	–	–
Feature 6	–	–	–	0.9473	–	–
Feature 7	–	0.9738	–	–	–	–
Feature 8	–	–	–	–	0.6315	–
Feature 9	–	–	–0.7404	–	–	–
Feature 10	–	–	–0.7769	–	–	–
Feature 11	–	–	0.8779	–	–	–
Feature 12	–	–	0.7534	–	–	–
Feature 13	–	–	0.7449	–	–	–
Feature 14	–	–	–0.4339	–	–	–
Feature 15	0.9785	–	–	–	–	–
Feature 16	0.9733	–	–	–	–	–
Feature 17	0.9778	–	–	–	–	–
Feature 18	–	–	–	–	0.8805	–
Feature 19	–	–	–	–	–	0.7950
Feature 20	–	–	–	–	–	0.8085
Feature 21	0.7383	–	–	–	–	–
Feature 22	0.7954	–	–	–	–	–
Feature 23	0.9785	–	–	–	–	–
Initial eigenvalues of principal components						
Value	6.1104	5.1788	4.2336	2.3068	1.8718	1.2290
The share of the variance of principal components, %						
Dispersion	26.567	22.516	18.407	10.029	8.138	5.343
Cumulative variance of principal components, %						
Dispersion	91.001					

Note: The rotated components of factor analysis are presented herein.

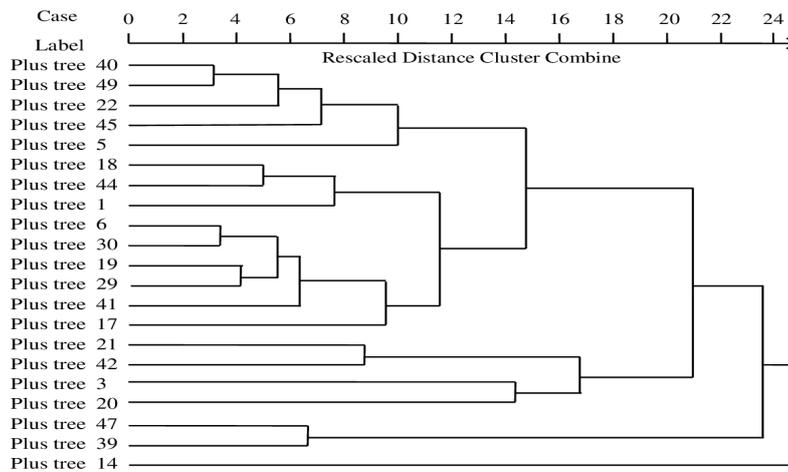


Fig. 3. Dendrogram of the similarities across plus trees based on the normalized values of the source characteristics of the physiological state of xylem

The clustering procedure was accomplished by constructing a hierarchical system, in which the plus trees were grouped according to the criterion of closest similarity for the analyzed feature combinations of the physiological state of xylem (Table 4, Fig. 3). This structure contains well-formed macroclusters with plus trees numbered 40, 49, 22, 45, 5, 18, 44, 1, 6, 30, 19, 29, 41 and 17. It has noticeable differences from the others in terms of the connection distances. Its own structure is represented by three micro-clusters of roughly the same additional density but with different numbers.

The dendrogram created with the principal components of the considered set of features (Table 5, Fig. 4) also had a discrete hierarchical composition. Meanwhile, while maintaining a certain specificity in each of the analysis options, the structures of these dendrograms were fundamentally similar. Note that the plus trees marked by the indices 40, 49, 22, 45, and 5, located on the first dendrogram (composed using the normalized values of 23 initial features) near each other, preserve the similarity of positions on the second dendrogram (created by 6 principal components). On both the first and second dendrograms, separate pairs of plus trees were detected, such as 18 and 44, 6 and 30, 47 and 39. In this case, in each of the variants of the analysis, plus tree 47 and plus tree 39 were among those that had the largest values with respect to the distance of the hierarchical cluster combination. The most specific object, the plus tree 14, remained in the same position on each of the dendrograms.

The resulting material revealed a fundamental similarity in the graphical representations of the structure with the relationship between the plus trees in the multidimensional space of features. This indicates that the observed connection related xylem state among the plus trees has a stable character.

The presence of plus trees, which have characteristics that largely distinguish them from others, indicates that these plus trees are potentially unrelated to the primary composition of the provided archive of clones.

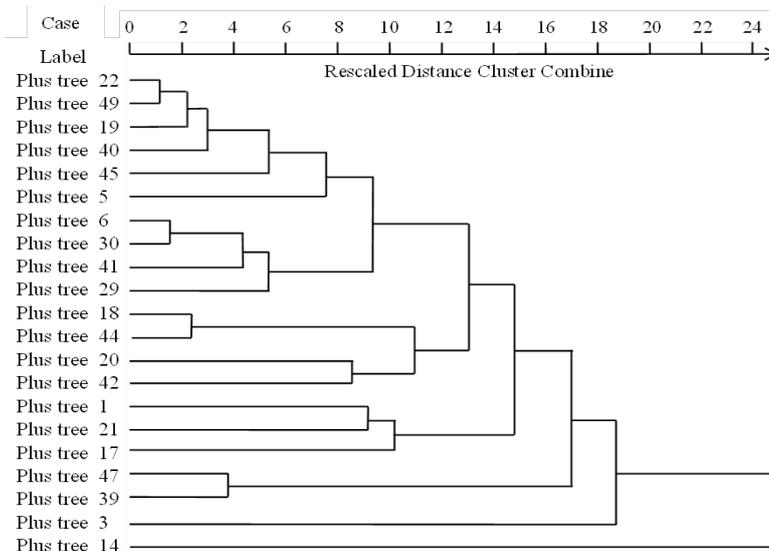


Fig. 4. Dendrogram of the similarities across plus trees based on of the principal components of physiological evaluation of the seasonal state of xylem

As the points for discussion. The results of this study provide an opportunity to test the potential genetic proximity of plus trees in practice. The tests are planned to be included in CSO. Objective information might reduce, and even eliminate completely, the risk of inbreeding depression of seed offspring. The requirement for a preliminary assessment of the reproductive compatibility of plus trees in forest seed plantations was noted by many experts and is reflected in the works of A. Lewandowski [34], D. Lindgren [36, 37], A. Sivacioglu and S. Ayan [50], T. Funda [22], O. Vanek [54], C. E. Durel [18, 19], H.P. Koelewijn [27], T. Wang [57], J.H. Russell and D.C. Ferguson [48], A.D. Bower and S.N. Aitken [13]. They emphasized the importance of generating a range of CSO at which the risk of inbreeding is minimized or eliminated entirely. Even though this problem was clear from the beginning of seed orchard development [33, 41, 42, 57], unfortunately, it is still relevant [2, 21, 23, 31]. Currently, the affords to resolve this issue are made quite widely in many countries of the world: in Poland [38], Portugal [20], Canada [51], New Zealand [1], Denmark [40], France [55], Japan [49], Finland [27], Spain [20], China [39], USA [21].

The main results of the investigation are the following:

the fact of heterogeneity was determined, and phenotypic differences for pine trees were revealed by the physiological characteristics (parameters) of the xylem state;

the hereditary dependence of the discovered physiological heterogeneity of the plus trees was proved, and the degree of genotypic conditionality of the specificity of the plus trees was determined by their ability (potential) to form a well-developed xylem and obtain a high level of its lignification;

a multiparametric assessment of the relative proximity of the studied plus trees according to the tested complex of physiological characteristics was obtained, and the most similar plus trees and those with complex differences, between which the greatest values were found;

an assessment of potential risks was given when the most similar physiological characteristics of plus trees were included in the composition of seed plantations, the

most preferred of the possible combinations of plus trees in the assortment of seed plantations were identified, ensuring minimization of the risk of inbred depression of their seed progeny.

Potential application of results – object and territorial aspects:

the results, the conclusions and the recommendations derived from them can be extended to other species of pine trees and other representatives of the pine family;

the presented methodological scheme can be applied to studies of a wide range of species of woody plants that belong to the pine family;

the tested methodical apparatus, the results that we obtained during its implementation, generalizations and conclusions based on them can be geographically extended to other regions.

Conclusions

The plus trees of Scots pine are heterogeneous with respect to the physiological state of xylem. To a large extent, their specific abilities to form xylem layers with diverse thicknesses during one vegetation period are determined by genotype. The rate of annual desiccation of shoot xylem cells (lignification) is also influenced by heredity. The carriers of these features are most favored in the composition of seed orchards. In composing clone archives, the ability to select a group of plus trees (and particular plus trees) that are the most distinct compared to others in physiological characteristics is essential. The hereditary nature of the features of such plus trees suggests that they have a minimum chance of being closely related. The use of this approach in the creation of seed orchards can reduce the risk of inbreeding depression in seed offspring and minimize its harmful consequences. The proposed method of comparative evaluation of the degree of genetic proximity of plus trees on the physiological parameters of xylem can be considered as one of the tools for testing their reproductive compatibility in the composition of clonal seed orchards.

REFERENCES

1. Arnold R.J. Controlling Pollinated Radiata Pine Seed – A Comparison of Seedling and Cutting Options for Large-Scale Deployment. *New Zealand Journal of Forestry*, 1990, vol. 35, iss. 3, pp. 12–17.
2. Baskin J.M., Baskin C.C. Inbreeding Depression and the Cost of Inbreeding on Seed Germination. *Seed Science Research*, 2015, vol. 25, iss. 4, pp. 355–385. <https://doi.org/10.1017/S096025851500032X>
3. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N. Selection Evaluation of Plus Trees of Scots Pine by Methods of Multidimensional Analysis. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2012, no. 2, pp. 58–64. (In Russ.).
4. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N. Formation and Lignification of the Xylem of Plus Trees of the Scots Pine. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 2, pp. 45–52. (In Russ.).
5. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Esichev A.O. Physiological State Evaluation of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 1, pp. 9–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.9>
6. Besschetnova N.N. Fat Content in the Cells of Shoots of Plus Trees of the Scots Pine. *Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2012, no. 4, pp. 48–55. (In Russ.).

7. Besschetnova N.N. *Scots Pine (Pinus sylvestris L.). Reproductive Potential of Plus Trees*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy Publ., 2015. 586 p. (In Russ.).
8. Besschetnova N.N. *Scots pine (Pinus sylvestris L.). Efficiency of Selection of Plus Trees*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy Publ., 2016. 464 p. (In Russ.).
9. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Scots Pine (Pinus sylvestris L.). Morphometry and Physiology of the Needles of Plus Trees*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2014. 369 p. (In Russ.).
10. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Variability of Morphometrical Characteristics of Needles at a Clonal Plantation of Plus Trees of Scots Pine (*Pinus sylvestris L.*). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2017, vol. 21, no. 2, pp.198–206. (In Russ.). <https://doi.org/10.18699/VJ17.237>
11. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Ershov P.V. Genotypic Conditionality of Plus Tree Needle Pigment Composition of Norway Spruce. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 1, pp. 63–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.63>
12. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kulkova A.V., Mishukova I.V. Starch Content in the Tissues of Shoots of Different Spruce Species (*Picea A. Dietr.*) Under Conditions of Introduction. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 4, pp. 57–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.57>
13. Bower A.D., Aitken S.N. Changes in Genetic Diversity of Whitebark Pine (*Pinus albicaulis* Engelm.) Associated with Inbreeding and White Pine Blister Rust Infection. *Silvae Genetica*, 2011, vol. 60, no. 3-4, pp. 113–123. <https://doi.org/10.1515/sg-2011-0016>
14. Camarero J.J., Guada G., Sánchez-Salguero R., Cervantes E. Winter Drought Impairs Xylem Phenology, Anatomy and Growth in Mediterranean Scots Pine Forests. *Tree Physiology*, 2016, vol. 36, iss. 12, pp. 1536–1549. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw077>
15. Chang C.Y., Fréchette E., Unda F., Mansfield S.D., Ensminger I. Elevated Temperature and CO₂ Stimulate Late-Season Photosynthesis but Impair Cold Hardening in Pine. *Plant Physiology*, 2016, vol. 172, iss. 2, pp. 802–818. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00753>
16. Chmura D., Guzik M., McCulloh K.A., Żytkowiak R. Limited Variation Found Among Norway Spruce Half-Sib Families in Physiological Response to Drought and Resistance to Embolism. *Tree Physiology*, 2016, vol. 36, iss. 2, pp. 252–266. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv141>
17. Do Nascimento F.J., Atroch A.L., Regazzi A.J. Evaluation of Characteristics of Guarana Clone Seedlings Using Factor Analysis. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2011, vol. 54, iss. 2, pp. 107–112. <https://doi.org/10.4322/rca.2012.002>
18. Durel C.E., Kremer A. Hybridization After Self-Fertilization: A Novel Perspective for the Maritime Pine Breeding Program. *Forest Genetics*, 1995, vol. 2, iss. 2, pp. 117–120.
19. Durel C.E., Bertin P., Kremer A. Relationship Between Inbreeding Depression and Inbreeding Coefficient in Maritime Pine. *Theoretical and Applied Genetics*, 1996, vol. 92, iss. 3-4, pp. 347–356. <https://doi.org/10.1007/BF00223678>
20. Fernández J., González-Martínez S.C. Allocating Individuals to Avoid Inbreeding in *ex situ* Conservation Plantations: So Far, So Good. *Conservation Genetics*, 2009, vol. 10, iss. 1, pp. 45–57. <https://doi.org/10.1007/s10592-008-9516-2>
21. Ford G.A., McKeand S.E., Jett J.B., Isik F. Effects of Inbreeding on Growth and Quality Features in Loblolly Pine. *Forest Science*, 2015, vol. 61, iss. 3, pp. 579–585. <https://doi.org/10.5849/forsci.13-185>

22. Funda T., Lstibůrek M., Lachout P., Klápště J., El-Kassaby Y.A. Optimization of Combined Genetic Gain and Diversity for Collection and Deployment of Seed Orchard Crops. *Tree Genetics & Genomes*, 2009, vol. 5, iss. 4, pp. 583–593. <https://doi.org/10.1007/s11295-009-0211-3>
23. Gömöry D. 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.
24. Kaushik N., Nautiyal S., Kaushik J.C., Beniwal S.R. Divergence Studies in Plus Trees of Neem (*Azadirachta indica*). *Indian Journal of Agroforestry*, 2007, vol. 9, iss. 2, pp. 106–110.
25. Kesari V., Sathyanarayana V.M., Parida A., Rangan L. Molecular Marker-Based Characterization in Candidate Plus Trees of *Pongamia pinnata*, a Potential Biodiesel Legume. *AoB Plants*, 2010, vol. 2010, plq017, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plq017>
26. Kinloch B.B., Westfall R.D., Forrest G.I. Caledonian Scots Pine: Origin and Genetic Structure. *New Phytologist*, 1986, vol. 104, iss. 4, pp. 703–729. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1986.tb00671.x>
27. Koelewijn H.P., Koski V., Savolainen O. Magnitude and Timing of Inbreeding Depression in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Evolution*, 1999, vol. 53, iss. 3, pp. 758–768. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1999.tb05370.x>
28. Koulelis P.P. Cluster Analysis in Primary Roundwood Production of 25 Countries of European Union. *Annals of Forest Research*, 2009, vol. 52, iss. 1, pp. 163–168.
29. Kramer P.J. The Role of Physiology in Forestry. *The Forestry Chronicle*, 1956, vol. 32, no. 3, pp. 297–308. <https://doi.org/10.5558/tfc32297-3>
30. Kramer P.J., Kozlovski T.T. *Physiology of Woody Plants*. 2nd Edition. New York, San Francisco, London, Academic Press Publ., 1979. 811 p.
31. Kroon J., Wennström U., Prescher F., Lindgren D., Mullin T.J. Estimation of Clonal Variation in Seed Cone Production Over Time in a Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Orchard. *Silvae Genetica*, 2009, vol. 58, no. 1-2, pp. 53–62. <https://doi.org/10.1515/sg-2009-0007>
32. Kulkova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Multivariate Analysis in Assessing Species Specificity of Representatives of the Genus Spruce (*Picea*). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 6, pp. 23–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.23>
33. Langner W., Stern K. Versuchstechnische Probleme bei der Anlage von Klonplantage. *Zeitschrift Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung*, 1955, no. 4, pp. 81–88. (In German)
34. Lewandowski A., Burczyk J., Wachowiak W., Boratyński A., Prus-Głowacki W. Genetic Evaluation of Seeds of Highly Endangered *Pinus uliginosa* Neumann from Węgliniec Reserve for *ex-situ* Conservation Program. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 2005, vol. 74, no. 3, pp. 237–242. <https://doi.org/10.5586/asbp.2005.030>
35. Lim K.-J., Paasela T., Harju A., Venäläinen M., Paulin L., Auvinen P., Kärkkäinen K., Teeri T.H. Developmental Changes in Scots Pine Transcriptome During Heartwood Formation. *Plant Physiology*, 2016, vol. 172, iss. 3, pp. 1403–1417. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01082>
36. Lindgren D. Effect of Tree Cover on Scots Pine Pollination and Seeds. *Forest Genetics*, 1994, vol. 1, no. 2, pp. 73–80.
37. Lindgren D. Seed Orchards and Supporting Breeding. Forest Tree Breeding. *Proceedings of the Conference: IUFRO. Prague, Czech Republic, 25–29 August 2014*. Prague, Czech Republic, Czech University of Life Sciences. Faculty of Forestry and Wood Sciences Publ., 2014, pp. 3.
38. Markiewicz P. Effects of Top Pruning on Flowering and Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Seed Orchard. Seed Orchards and Breeding Theory. *Proceedings of the*

Conference. Antalya, Turkey, 21–25 May 2012. Turkey, Isparta, Forestry Faculty of Suleyman Demirel University Publ., 2012, pp. 48–50.

39. Miao Y.C., Zhang Z.J., Su J.R. Low Genetic Diversity in the Endangered *Taxus yunnanensis* Following a Population Bottleneck, a Low Effective Population Size and Increased Inbreeding. *Silvae Genetica*, 2016, vol. 65, iss. 1, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1515/sg-2016-0008>

40. Nielsen U.B., Hansen O.K. Response to Selfing in Seed Set, Seedling Establishment and Nursery Growth Based on Controlled Crosses of *Abies nordmanniana* Clones. *Silvae Genetica*, 2010, vol. 59, iss. 2-3, pp. 90–98. <https://doi.org/10.1515/sg-2010-0011>

41. Orr-Ewing A.L. A Cytological Study of the Effects of Self-Pollination on *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Fanco. *Silvae Genetica*, 1957, no. 6, pp. 147–161.

42. Orr-Ewing A.L. Further Inbreeding Studies with Douglas Fir. *The Forestry Chronicle*, 1957, vol. 33, iss. 4, pp. 318–332. <https://doi.org/10.5558/tfc33318-4>

43. Park P.S., Oliver C.D. Variability of Stand Structures and Development in Old-Growth Forests in the Pacific Northwest, USA. *Forests*, 2015, vol. 6, iss. 9, pp. 3177–3196. <https://doi.org/10.3390/f6093177>

44. Peguero-Pina J.J., Morales F., Gil-Pelegrín E. Frost Damage in *Pinus sylvestris* L. Stems Assessed by Chlorophyll Fluorescence in Cortical Bark Chlorenchyma. *Annals of Forest Science*, 2008, vol. 65, no. 8, art. no. 813, pp. 813 – 813. <https://doi.org/10.1051/forest:2008068>

45. Plomion C., Leprovost G., Stokes A. Wood Formation in Trees. *Plant Physiology*, 2001, vol. 127, no. 4, pp. 1513–1523. <https://doi.org/10.1104/pp.010816>

46. Powers M.D., Pregitzer K.S., Palik B.J., Webster C.R. The Physiological Basis for Regeneration Response to Variable Retention Harvest Treatments in Three Pine Species. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2011, vol. 84, iss. 1, pp. 13–22. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq038>

47. Pravdin L.F. Scots Pine. *Variability, Intraspecific Systematics and Selection*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 190 p. (In Russ.).

48. Russell J.H., Ferguson D.C. Preliminary Results from Five Generations of a Western Redcedar (*Thuja plicata*) Selection Study with Self-Mating. *Tree Genetics & Genomes*, 2008, vol. 4, iss. 3, pp. 509–518. <https://doi.org/10.1007/s11295-007-0127-8>

49. Sato A., Sawamura Y., Takada N., Hirabayashi T. Relationship Between Inbreeding Coefficients and Plant Height of 1-Year-Old Seedlings in Crosses Among Japanese Pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) Cultivars/Selections. *Scientia Horticulturae-Amsterdam*, 2008, vol. 117, iss. 1, pp. 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.03.005>

50. Sivacıoğlu A., Ayan S. Evaluation of Seed Production of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Clonal Seed Orchard with Cone Analysis Method. *African Journal of Biotechnology*, 2008, vol. 7, iss. 24, pp. 4393–4399. <https://doi.org/10.5897/AJB08.776>

51. Stoehr M., Ott P., Woods J.H. Inbreeding in Mid-Rotation Coastal Douglas-Fir: Implications for Breeding. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, iss. 2, pp. 195–204. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0414-0>

52. Tausz M., Bytnerowicz A., Arbaugh M.J., Wonisch A., Grill D. Multivariate Patterns of Biochemical Responses of *Pinus ponderosa* Trees at Field Plots in the San Bernardino Mountains, Southern California. *Tree Physiology*, 2001, vol. 21, iss. 5, pp. 329–336. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.5.329>

53. Temesgen H., Barrett T.M., Latta G. Estimating Cavity Tree Abundance Using Nearest Neighbor Imputation Methods for Western Oregon and Washington Forests. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, no. 3, pp. 337–354. <https://doi.org/10.14214/sf.241>

54. Vanek O., Procházková Z., Matějka K. Analysis of the Genetic Structure of a Model Scots Pine (*Pinus sylvestris*) Seed Orchard for Development of Management Strategies. *Journal of Forest Science*, 2013, vol. 59, no. 10, pp. 377–387. <https://doi.org/10.17221/39/2013-JFS>

55. Vidal M., Plomion C., Raffin A., Harvengt L., Bouffier L. Forward Selection in a Maritime Pine Polycross Progeny Trial Using Pedigree Reconstruction. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, iss. 21, pp. 2–12. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0596-8>

56. Vidyakin A.I. Efficiency of Positive Breeding of Woody Plants. *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, iss. 27, no. 1-2, pp. 18–24.

57. Wang T., Hagqvist R., Tigerstedt P.M.A. Inbreeding Depression in Three Generations of Selfed Families of Silver Birch (*Betula pendula*). *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 29, no. 6, pp. 662–668. <https://doi.org/10.1139/x99-036>

58. Zeltniš P., Matisons R., Gailis A., Jansons J., Katrevičs J., Jansons Ā. Genetic Parameters of Growth Traits and Stem Quality of Silver Birch in a Low-Density Clonal Plantation. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 2, art. no. 52, pp. 52(1)–52(8). <https://doi.org/10.3390/f9020052>

59. Zou J., Sun Y., Li L., Wang G., Yue W., Lu Z., Wang Q., Liu J. Population Genetic Evidence for Speciation Pattern and Gene Flow Between *Picea wilsonii*, *P. morrisonicola* and *P. neoveitchii*. *Annals of Botany*, 2013, vol. 112, iss. 9, pp. 1829–1844. <https://doi.org/10.1093/aob/mct241>

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*812:630*165
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-26-40

Сравнительная оценка физико-механических свойств древесины различных климатипов сосны обыкновенной

С.В. Ребко¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAS-6402-2021](https://orcid.org/0000-0002-6892-2859),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

П.Г. Мельник^{2,3}, канд. с.-х. наук, доц., ст. науч. сотр.; *ResearcherID*: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

А.В. Козел¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAS-2816-2021](https://orcid.org/0000-0002-2755-4439),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2755-4439>

Л.Ф. Поплавская¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAS-9040-2021](https://orcid.org/0000-0002-2270-5234),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2270-5234>

П.В. Тупик¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAS-7533-2021](https://orcid.org/0000-0002-5946-4470),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5946-4470>

В.В. Носников¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAS-8949-2021](https://orcid.org/0000-0002-5562-1184),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5562-1184>

¹Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13 а, Минск, Республика Беларусь, 220006; rebko@belstu.by, kozel@belstu.by, poplavskaya@belstu.by, pavel_tupik@belstu.by, nosnikov@belstu.by

²Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; melnik_petr@bk.ru

³Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., Россия, 143030; melnik_petr@bk.ru

Поступила в редакцию 12.04.21 / Одобрена после рецензирования 26.07.21 / Принята к печати 05.08.21

Аннотация. Для эффективного и рационального использования в производстве древесины сосны обыкновенной различного географического происхождения необходимо знать ее физико-механические свойства. Целью исследования является определение физических (плотность древесины в абсолютно сухом состоянии и при 12%-й влажности) и механических (прочность древесины при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе) свойств древесины 17 климатических экотипов сосны и проведение сравнительного анализа полученных показателей в отдельности для каждого происхождения и при их группировке по подвидам в соответствии с классификацией Л.Ф. Правдина. Диапазон географического происхождения мест заготовки семян – от 47 до 62° с. ш. и от 22 до 85° в. д. Для проведения исследований была использована современная универсальная испытательная машина MTS Insight 100. Установлено, что плотность древесины в абсолютно сухом состоянии варьирует от 370 (курский климатип) до 524 кг/м³ (волгоградский климатип), при 12%-й влажности – от 397 (курский климатип) до 550 кг/м³ (волгоградский климатип). Прочность древесины исследуемых климатипов при сжатии вдоль волокон составила от 32 (курский климатип) до 54 МПа (волгоградский климатип), при статическом изгибе – от 55 до 92 МПа у вологодского и ульяновского климатипов соответственно. Максимальная плотность древесины при 12%-й влажности характерна для подвида сосны

обыкновенной европейской и составляет 497 ± 8 кг/м³, минимальное значение данного показателя у сосны обыкновенной сибирской – 423 ± 30 кг/м³. Промежуточное положение занимают сосны лапландская и лесостепная со значениями 483 ± 16 и 464 ± 12 кг/м³ соответственно. Прочность древесины при сжатии вдоль волокон у исследуемых подвигов составила от 47 ± 1 (европейская) до 33 ± 4 МПа (сибирская), у сосны лапландской – 44 ± 2 МПа и несколько ниже у сосны лесостепной – 42 ± 2 МПа. Максимальная прочность древесины при статическом изгибе характерна для сосны европейской – 78 ± 4 МПа, а минимальная – для сосны сибирской – 61 ± 14 МПа. Данный показатель имеет равные значения для сосны лесостепной и лапландской – 72 ± 4 МПа.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, климатип, плотность древесины, прочность древесины, статический изгиб, изменчивость

Для цитирования: Ребко С.В., Мельник П.Г., Козел А.В., Поплавская Л.Ф., Тупик П.В., Носников В.В. Сравнительная оценка физико-механических свойств древесины различных климатипов сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 26–40. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-26-40>

Original article

Comparison of Physical and Mechanical Properties of Scots Pine Wood Grown in Different Climates

*Siarhei U. Rabko*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAS-6402-2021](https://orcid.org/0000-0002-6892-2859), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

Petr G. Melnik^{2,3}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Senior Research Scientist;

ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

*Aleksandr V. Kozel*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAS-2816-2021](https://orcid.org/0000-0002-2755-4439),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2755-4439>

*Liliya F. Papluskaya*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAS-9040-2021](https://orcid.org/0000-0002-2270-5234),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2270-5234>

*Pavel V. Tupik*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAS-7533-2021](https://orcid.org/0000-0002-5946-4470),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5946-4470>

*Vadzim V. Nosnikau*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAS-8949-2021](https://orcid.org/0000-0002-5562-1184),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5562-1184>

¹Belarusian State Technological University, ul. Sverdlova, 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; rebko@belstu.by, kozol@belstu.by, poplavskaya@belstu.by, pavel_tupik@belstu.by, nosnikov@belstu.by

²Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University (National Research University), ul. 1-ya Institut'skaya, 1, Mytishchi-5, Moscow Region, 141005, Russian Federation; melnik_petr@bk.ru

³Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation; melnik_petr@bk.ru

Received on April 12, 2021 / Approved after reviewing on July 26, 2021 / Accepted on August 05, 2021

Abstract. It is important to comprehend the physical and mechanical properties of Scots pine wood from various geographical origins in order to use it effectively and rationally in production. The purpose of the study is to determine the physical and mechanical properties

of Scots pine wood from 17 climatic ecotypes and to conduct a comparative analysis of the received indicators for the studied climatotypes separately and for subspecies, which were grouped according to the classification of L.F. Pravdin. The physical properties that were chosen for the investigation were wood density in an absolutely dry state and at 12 % moisture content. The mechanical characteristics were the tensile strength of the wood along the fibers and the tensile strength in static bending. The range of geographic origins of the seed harvesting locations was from 47 to 62 °N and 22 to 85 °E. The investigation was conducted using contemporary universal testing equipment, MTS Insight 100. It was found that the density of the wood varied from 370 kg/m³ (Kursk climatotype) to 524 kg/m³ (Volgograd climatotype) under absolutely dry conditions and from 397 kg/m³ (Kursk climatotype) to 550 kg/m³ (Volgograd climatotype) at 12 % moisture content. The tensile strength of wood along the fibers ranged from 32 MPa (Kursk climatotype) to 54 MPa (Volgograd climatotype), while the tensile strength in static bending was from 55 to 92 MPa for the Vologda and Ulyanovsk climatotypes, respectively. The maximum wood density at 12 % moisture content was 497±8 kg/m³, which is typical for European subspecies. The minimum value of this indicator was 423±30 kg/m³. The medium values had Lapland subspecies and Steppe subspecies 483±16 kg/m³ and 464±12 kg/m³, respectively. The tensile strength of wood along the fibers in the studied subspecies ranged from 47±1 MPa (European subspecies) to 33±4 MPa (Siberian subspecies). For Lapland subspecies, it was 44±2 MPa and slightly lower for Steppe subspecies, which was 42±2 MPa. The maximum value of the tensile strength in static bending for European subspecies was 78±4 MPa. The minimum value for the Siberian subspecies was 61±14 MPa. This indicator was equal for Steppe subspecies and Lapland subspecies, which was 72±4 MPa.

Keywords: Scots pine, climatotype, wood density, tensile strength of wood, static bending, variability

For citation: Rabko S.U., Melnik P.G., Kozel A.V., Paplauskaya L.F., Tupik P.V., Nosnikau V.V. Comparison of Physical and Mechanical Properties of Scots Pine Wood Grown in Different Climatotypes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 26–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-26-40>

Введение

Одними из важнейших показателей качества древесины сосны обыкновенной являются ее плотность и прочность, что необходимо учитывать как при лесовыращивании, так и при промышленном использовании древесины [21–25]. Плотность влияет не только на физические свойства древесины, но и на механические [8, 26], выступая в качестве наиболее объективного и универсального показателя ее качества. В большинстве случаев между плотностью и прочностью древесины существует четко выраженная прямая зависимость – чем выше плотность, тем выше прочность, причем степень корреляции достигает 0,8–0,9 [12, 18, 19, 23, 24].

Ряд ученых в своих работах отмечает существенные различия климатипов по приживаемости [16, 27], сохранности [10, 16], росту [4, 5], устойчивости к вредителям и болезням [3, 6], продуктивности [1, 9], а также по составу хлорофилла и строению хвоинок [7, 13], составу эфирных масел [15], плодоношению и другим признакам [2, 11, 17]. Следовательно, возникает вопрос о возможном различии качества древесины у разных климатипов, которое определяется показателями физико-механических свойств.

Уникальными в этом плане опытными модельными объектами являются географические культуры, создаваемые семенным потомством наиболее характерных популяций разных экотипов (климатипов) с целью их испытания в новых

условиях. Такие модельные объекты служат базой для изучения географической изменчивости наследственных свойств лесных пород. Первые опыты с географическими культурами сосны обыкновенной были начаты под Москвой в 1878–1893 гг. М.К. Турским на Лесной опытной даче Петровской земледельческой и лесной академии (в настоящее время Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева).

Цель работы – определение физических (плотность древесины в абсолютно сухом состоянии и при 12%-й влажности) и механических (прочность древесины при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе) свойств древесины различных климатических экотипов сосны обыкновенной и проведение сравнительного анализа полученных показателей у исследуемых провениенций. Новизна исследований заключается в том, что впервые в Беларуси определены физико-механические свойства древесины сосны обыкновенной различного происхождения в приспевающем возрасте в диапазоне географического происхождения мест заготовки семян от 47 до 62° с. ш. и от 22 до 85° в. д.

Объекты и методы исследования

В Беларуси первые географические культуры сосны обыкновенной заложены в 1959 г. В.Г. Мишневым и Е.Д. Манцевичем совместно с Центральной контрольной станцией лесных семян и Белорусской контрольной станцией лесных семян на площади 8,7 га и состояли из 65 географических вариантов с диапазоном географического происхождения 48–62° с. ш. 22–111° в. д.

Семена получены из 200 пунктов бывшего Советского Союза. Однако большая их часть была исключена из-за типологической неоднородности. В результате отобрано 65 образцов семян из насаждений группы типов леса боры-зеленомошники. Посев семян осуществлен в апреле 1958 г. в питомнике Негорельского учебно-опытного лесхоза. По механическому составу почва в питомнике представляет собой песок связный. Для получения одинаковой густоты стояния сеянцев в одной строке высевалось одинаковое количество жизнеспособных семян на 1 пог. м. После посева гряды покрывались мхом. До середины июля всходы отенялись драночными щитами. За сеянцами проводился уход, заключающийся в 3-кратной прополке и рыхлении почвы.

Участок под географические культуры отведен в квартале № 15, лесокультурная площадь представляла собой вырубку 1958 г., вытянутую с севера на юг и имеющую правильную конфигурацию. Осенью лесосека была раскорчевана и выровнена бульдозером, затем вспахана на глубину 25 см. В апреле 1959 г. площадь повторно выравнивалась бульдозером и бороновалась дисковыми боронами в 2 следа. Перед посадкой культур производилась окончательная планировка площади вручную с выборкой и сжиганием корней.

Пространственное размещение культур произведено по принципу выделения крупных климатических районов. Эти районы располагаются на участке в направлении с севера на юг, а с запада на восток группируются по признаку наибольшего географического различия. Каждая административная область представлена участком культур площадью 0,1 га. Эти участки ограничены со всех сторон 2-метровой дорогой и остолблены. С западной стороны ко всему участку примыкает 4-метровая дорога. В настоящее время площадь культур составляет 6 га, количество сохранившихся вариантов – 44.

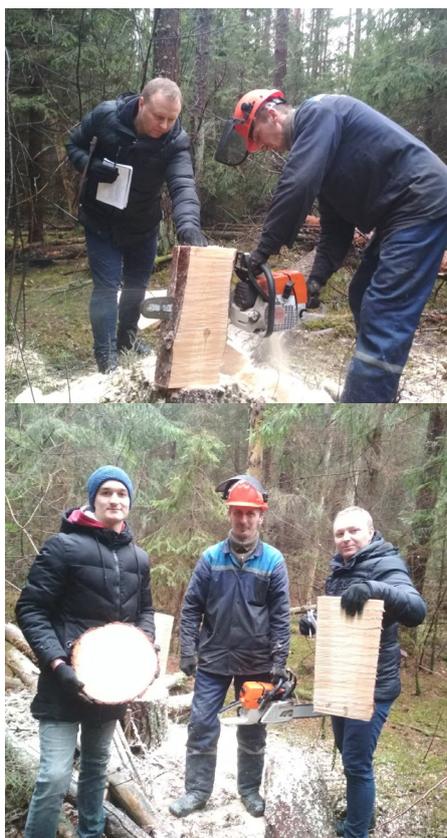
Исследуемые географические культуры сосны обыкновенной расположены в Негорельском лесничестве Негорельского учебно-опытного лесхоза, который является филиалом Белорусского государственного технологического университета и расположен в Дзержинском районе Минской области Республики Беларусь (в 50 км от г. Минска). Возраст климатипов сосны обыкновенной, произрастающих в географических культурах на момент исследования, – 60 лет.

Для оценки физико-механических свойств древесины были отобраны 17 климатипов из вариантов происхождений мест заготовки семян в диапазоне 47–62° с. ш. и 22–85° в. д. Выбор климатипов с таким диапазоном географических координат мест заготовки семян обусловлен тем, что указанные материнские древостои соответствуют классификации Л.Ф. Правдина [14]. Им выделено 5 подвидов сосны обыкновенной: лапландская, европейская, сибирская, степная и крючковатая. Исследуемые климатипы распределены нами по данным подвидам следующим образом. В подвид лапландская (61–62° с. ш.) вошли архангельский и ленинградский климатипы, в подвид европейская – европейская западная (53–59° с. ш. 22–40° в. д.) с вологодским, эстонским, латвийским, витебским и минским климатипами и европейская восточная (54° с. ш. 48–58° в. д.) с ульяновским и башкирским климатипами. К подвиду сибирской (57° с. ш. 85° в. д.) отнесен томский климатип. Ввиду отсутствия представителей подвида сосны степной (кустанайский, акмолинский, павлодарский, кокчетавский и семипалатинский климатипы из Казахстана погибли на ранних этапах роста) условно выделен подвид сосны обыкновенной лесостепной (47–51° с. ш. 27–42° в. д.) с белгородским, курским, волгоградским, хмельницким, полтавским и ростовским климатипами. Сосна обыкновенная крючковатая, естественно произрастающая в Крыму и на Кавказе, в географических культурах не представлена изначально. Таким образом, для более логического анализа физико-механических свойства древесины исследуемые климатипы сосны обыкновенной распределены в соответствии с классификацией Л.Ф. Правдина с небольшими изменениями.

Для изучения свойств древесины у 5 модельных деревьев каждого из исследуемых климатипов в феврале 2020 г. (см. рисунок *а*) были взяты отрезки стволов длиной по 60 см на высоте 6,5 м, после чего из них изготавливались образцы для изучения физико-механических свойств древесины: по 10 образцов древесины из расчета на одно модельное дерево для определения параметров каждого изучаемого физико-механического свойства древесины.

В качестве изучаемых свойств древесины выбраны плотность в абсолютно сухом состоянии и при 12%-й влажности, прочность при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе. Измерение данных свойств проведено в мае 2020 г. в соответствии с общепринятыми методиками: ГОСТ 16483.0–78 «Древесина. Методы отбора образцов и общие требования при физико-механических испытаниях», ГОСТ 16483.1–84 «Древесина. Метод определения плотности», ГОСТ 16483.3–84 «Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе», ГОСТ 16483.7–71 «Древесина. Методы определения влажности», ГОСТ 16483.10–73 «Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон». Использована универсальная испытательная машина MTS Insight 100 (см. рисунок *б*). Данный аппарат позволяет получить результаты с достаточно высокой точностью, что послужило главным критерием выбора

этого оборудования. Оценка достоверности различий полученных результатов осуществлялась с помощью пакета MS Excel. Для подтверждения или опровержения гипотезы об отнесении к одной и той же совокупности средних значений показателей физико-механических свойств древесины рассчитывался t-критерий Стьюдента, или t-критерий различия. В данном случае он позволяет найти вероятность того, что обе средних величины относятся к одной и той же совокупности. Перерасчет показателей на стандартную влажность для образцов с влажностью в момент испытания осуществляли по общепринятой формуле в соответствии с ГОСТ 16483.1–84 [20].

*а**б*

Заготовка образцов спилов сосны обыкновенной различного происхождения в географических культурах (*а*) для определения физико-механических свойств древесины с использованием универсальной испытательной машины MTS Insight 100 (*б*)
Preparation of Scots pine cross-section samples with various origins in geographic forest plantations (*a*) for determination of physical and mechanical properties of wood using the universal testing machine, MTS Insight 100 (*b*)

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты статистической обработки показателей плотности древесины в абсолютно сухом состоянии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистическая обработка значений плотности древесины (кг/м³) в абсолютно сухом состоянии
Statistical data processing of wood density (kg/m³) in an absolutely dry state

Показатель	К-1	В-4	Б-5	Э-8	В-9	Л-10	Б-11	Г-15	Т-23	У-41	Р-47	М-48	А-52	Л-53	П-55	В-57	Х-58
\bar{X}	369,65	480,53	457,21	492,08	524,09	475,19	502,58	478,32	398,50	469,63	472,52	431,48	460,59	442,49	396,98	389,26	423,47
$S_{\bar{X}}$	3,25	5,27	17,77	6,76	9,15	5,36	3,04	7,24	12,88	13,48	6,32	4,65	8,69	11,81	4,68	3,64	2,64
S	19,25	27,87	47,01	23,43	47,52	19,33	14,26	27,09	40,72	52,19	27,55	14,71	27,47	35,42	19,29	14,11	9,88
Min	338,65	443,46	400,91	452,34	434,43	455,00	476,75	445,80	349,20	392,00	436,19	408,43	438,36	380,50	369,85	376,17	406,98
Max	429,39	557,60	525,78	528,40	623,81	526,13	543,65	543,34	455,40	541,62	531,03	448,09	511,18	488,34	433,71	417,33	436,19
$t_{0,5} S_{\bar{X}}$	6,61	10,81	43,47	14,89	18,80	11,68	6,32	15,64	29,13	28,90	13,28	10,52	19,65	27,22	9,92	7,81	5,70
P, %	0,88	1,10	3,89	1,37	1,75	1,13	0,61	1,51	3,23	2,87	1,34	1,08	1,89	2,67	1,18	0,94	0,62
V, %	5,21	5,80	10,28	4,76	9,07	4,07	2,84	5,66	10,22	11,11	5,83	3,41	5,96	8,00	4,86	3,62	2,33

Примечание: К-1 – курский климатип; В-4 – витебский; Б-5 – белгородский; Э-8 – эстонский; В-9 – волгоградский; Л-10 – латвийский; Б-11 – бурятский; Г-15 – гродненский; Т-23 – томский; У-41 – ульяновский; Р-47 – ростовский; М-48 – минский; А-52 – архангельский; Л-53 – ленинградский; П-55 – полтавский; В-57 – вологодский; Х-58 – хмельницкий. \bar{X} – среднее арифметическое значение; $S_{\bar{X}}$ – ошибка среднее арифметическое значение; S – коэффициент вариации; $t_{0,5} S_{\bar{X}}$ – доверительный интервал; P – точность; V – коэффициент вариации.

Из приведенных данных (табл. 1) видно, что средняя плотность различных климатипов находится в пределах 370–524 кг/м³, т. е. вариация более 150 кг/м³. Опираясь на литературные сведения [19], представляющие собой усредненные показатели, вычисленные по сильно изменчивым величинам, можно отметить, что плотность древесины сосны в абсолютно сухом состоянии равняется примерно 480 кг/м³. Изменчивость рассматриваемого показателя незначительна и в большинстве случаев не превосходит 10 %. Величина относительной ошибки не превышает 5 %.

Статистическая обработка данных показала, что во многих случаях доверительные интервалы одной совокупности (климатипа) в некоторой степени перекрываются доверительными интервалами другой совокупности. Установлено, что плотность древесины витебского и гродненского климатипов находится в пределах одной совокупности, а средняя плотность выборки минского климатипа достоверно отличается от средней плотности первых двух. Средняя плотность выборки белгородского климатипа достоверно не отличается от средней плотности 10 других изучаемых климатипов. Средняя плотность древесины волгоградского климатипа достоверно отличается от плотности всех остальных климатипов. Курский и бурятский климатипы достоверно не отличаются от томского и эстонского соответственно. В среднем плотность одного климатипа достоверно не отличалась от аналогичных показателей 5 любых других климатипов.

Плотность древесины напрямую зависит от влажности, поэтому в древесиноведении общепринятым является проведение сравнительной оценки свойств древесины при стандартной влажности, равной 12 % (табл. 2). Данную плотность трудно получить непосредственно из опыта, так как сложно привести древесину к влажности точно 12 %. Поэтому плотность древесины при 12%-й влажности находится расчетным способом по соответствующим формулам в зависимости от влажности древесины в момент испытания в соответствии с ГОСТ 16483.1–84. Согласно [19, 20], средняя плотность древесины сосны при такой влажности соответствует 505 кг/м³. По данным ГОСТ 16483.10–73, плотность может колебаться в большую или меньшую сторону от указанного среднего значения – от 350 до 650 кг/м³. Средняя плотность древесины сосны по климатипам изменяется в пределах 397–550 кг/м³. Что касается статистических показателей, то здесь наблюдается схожая ситуация с результатами для плотности древесины в абсолютно сухом состоянии. Это объясняется тем, что плотность древесины при 12%-й влажности находилась путем перерасчета аналогичных показателей при влажности в момент испытания в соответствии с ГОСТ 16483.1–84.

С плотностью древесины тесно связаны ее механические свойства, которые характеризуют способность материала сопротивляться действию внешних механических усилий. Данные свойства древесины сильно зависят от ее влажности, поэтому оценка и сравнение результатов механических испытаний проводятся при стандартной 12%-й влажности.

Результаты статистической обработки значений предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон представлены в табл. 3. Прочность древесины при сжатии вдоль волокон является наиболее характерным из механических свойств древесины и наиболее важным в практическом отношении. Согласно некоторым литературным сведениям [12], данный показатель может изменяться от 27 до 63 МПа, при среднем значении 46 МПа. Полученные средние прочностные показатели испытываемых образцов всех климатипов находились в пределах 32–54 МПа.

Таблица 2

Статистическая обработка значений плотности древесины (кг/м³)

при 12%-й влажности

Statistical data processing of wood density (kg/m³) at 12% moisture content

Показатель	К-1	В-4	Б-5	Э-8	В-9	Л-10	Б-11	Г-15	Т-23	У-41	Р-47	М-48	А-52	Л-53	П-55	В-57	Х-58
\bar{X}	396,50	509,14	488,60	521,07	550,39	502,53	530,01	509,47	423,22	496,59	498,82	459,06	489,96	474,38	423,56	415,21	452,17
$S_{\bar{x}}$	3,47	5,35	17,80	7,46	9,38	5,13	3,13	7,84	13,13	13,76	6,49	4,46	9,08	11,97	4,98	4,05	2,95
S	20,52	28,30	47,09	25,83	48,76	18,51	14,66	29,35	41,51	53,28	28,30	14,12	28,73	35,90	20,55	15,68	11,03
Min	364,04	470,65	431,13	478,86	458,65	482,90	505,24	474,29	371,49	409,32	465,54	437,84	467,12	414,30	396,26	396,94	434,74
Max	461,13	589,19	557,33	561,23	654,61	551,34	573,89	580,04	480,70	569,05	559,76	472,05	543,21	521,03	461,36	444,11	466,67
$t_{0,5}S_{\bar{x}}$	7,05	10,97	43,56	16,41	19,29	11,19	6,50	16,94	29,70	29,50	13,64	10,10	20,55	27,59	10,56	8,68	6,37
P, %	0,87	1,05	3,64	1,43	1,70	1,02	0,59	1,54	3,10	2,77	1,30	0,97	1,85	2,52	1,18	0,97	0,65
V, %	5,18	5,56	9,64	4,96	8,86	3,68	2,77	5,76	9,81	10,73	5,67	3,07	5,86	7,57	4,85	3,78	2,44

Таблица 3

Статистическая обработка значений предела прочности древесины

при сжатии вдоль волокон (МПа) при 12%-й влажности

Statistical data processing for tensile strength of the wood along the fibers (MPa) at 12% moisture content

Показатель	К-1	В-4	Б-5	Э-8	В-9	Л-10	Б-11	Г-15	Т-23	У-41	Р-47	М-48	А-52	Л-53	П-55	В-57	Х-58
\bar{X}	31,84	48,80	40,48	48,93	53,63	47,49	49,84	46,26	33,35	46,47	48,47	42,03	47,41	40,61	36,43	38,71	42,46
$S_{\bar{x}}$	0,39	0,65	3,16	0,99	1,23	0,73	0,86	0,75	1,71	2,01	0,84	0,64	1,19	0,89	0,68	0,69	0,56
S	2,33	3,45	8,35	3,44	6,37	2,63	4,04	2,81	5,41	7,79	3,66	2,03	3,75	2,66	2,82	2,68	2,10
Min	26,97	42,77	28,79	43,30	42,51	43,31	39,27	43,16	27,02	34,25	43,34	38,70	43,44	35,39	32,48	35,98	38,97
Max	36,59	58,96	52,53	55,14	64,55	51,92	54,03	50,72	42,61	58,11	54,66	44,77	54,69	42,83	41,67	43,80	46,69
$t_{0,5}S_{\bar{x}}$	0,80	1,34	7,72	2,18	2,52	1,59	1,79	1,63	3,87	4,32	1,77	1,45	2,68	2,04	1,45	1,49	1,21
P, %	1,24	1,33	7,80	2,03	2,29	1,54	1,73	1,63	5,13	4,33	1,73	1,53	2,50	2,18	1,88	1,79	1,32
V, %	7,32	7,06	20,63	7,02	11,89	5,54	8,11	6,08	16,23	16,77	7,56	4,84	7,91	6,54	7,73	6,94	4,94

Таблица 4

Статистическая обработка значений прочности древесины при статическом изгибе (МПа) при 12%-й влажности
Statistical data processing for tensile strength in static bending (MPa) at 12% moisture content

Показатель	К-1	В-4	Б-5	Э-8	В-9	Л-10	Б-11	Г-15	Т-23	У-41	Р-47	М-48	А-52	Л-53	П-55	В-57	Х-58
\bar{X}	59,36	90,25	73,83	87,42	89,21	76,20	71,19	80,34	60,84	92,44	86,46	73,35	76,59	68,11	63,15	54,85	60,04
S_x	4,47	1,66	4,76	1,05	2,57	1,31	6,35	4,79	5,20	3,99	1,17	1,80	1,97	2,35	1,68	4,09	5,84
S	9,99	3,72	11,66	2,36	5,74	2,92	14,20	10,71	11,62	8,91	2,34	4,03	4,40	5,25	3,75	9,15	13,05
Min	47,95	83,90	63,30	85,25	80,35	71,72	46,54	71,83	50,72	86,08	83,52	68,86	71,71	61,74	59,31	40,18	39,71
Max	75,09	93,75	89,98	90,31	94,71	79,19	82,98	98,19	75,26	107,53	88,61	77,61	82,90	75,40	68,84	64,93	68,98
$t_{0,5x}$	12,41	4,62	12,24	2,92	7,13	3,63	17,63	13,30	14,43	11,07	3,72	5,00	5,47	6,51	4,66	11,36	16,20
P, %	7,53	1,84	6,45	1,21	2,88	1,72	8,92	5,96	8,54	4,31	1,35	2,46	2,57	3,44	2,66	7,46	9,72
V, %	16,83	4,12	15,80	2,69	6,43	3,84	19,95	13,33	19,10	9,64	2,70	5,49	5,75	7,70	5,95	16,68	21,73

Анализируя статистические показатели значений прочности древесины при сжатии вдоль волокон, нетрудно заметить, что они имеют определенное сходство с результатами для плотности древесины. Например, прочность древесины белгородского климатипа достоверно не отличается от 10 любых других, латвийского – от 7 любых других. Вместе с тем есть и определенные отличия. Так, древесина бурятского климатипа по прочности не имеет достоверных различий с 5 другими климатипами, в то время как по плотности древесины он достоверно не отличается только от эстонского климатипа. Прочностные показатели белорусских климатипов оказались достоверно различными.

Поскольку изменчивость прочности древесины во многих вариантах была значительной ($V > 10\%$), а относительная ошибка в 6 случаях превышала 5%, сравнительный анализ прочностных показателей древесины при статическом изгибе в пределах климатипов не проводился (табл. 4).

Полученные показатели физико-механических свойств древесины различных климатипов сосны обыкновенной, сгруппированных в соответствии с классификацией Л.Ф. Правдина по подвидам, имеют определенную закономерность. Максимальная плотность древесины при 12%-й влажности характерна для подвида сосны обыкновенной европейской – 497 ± 8 кг/м³, минимальная – для сосны обыкновенной сибирской – 423 ± 30 кг/м³. Промежуточное положение занимают сосны лапландская и лесостепная – 483 ± 16 и 464 ± 12 кг/м³ соответственно. Прочность древесины при сжатии вдоль волокон у иссле-

двух подвидов составила от 47 ± 1 (европейская) до 33 ± 4 МПа (сибирская), у сосны лапландской – 44 ± 2 МПа и несколько ниже у сосны лесостепной – 42 ± 2 МПа. Максимальная прочность древесины при статическом изгибе отмечена для подвида сосны европейской – 78 ± 4 МПа, минимальная – для сосны сибирской – 61 ± 14 МПа, у сосен лесостепной и лапландской данный показатель составил 72 ± 4 МПа (табл. 5).

Таблица 5

Физико-механические свойства древесины сосны обыкновенной разных подвидов
Indicators of physical and mechanical properties of Scots pine wood subspecies

Климатип	Географические координаты, ...°		Плотность древесины при 12%-й влажности, кг/м ³	Прочность древесины при сжатии вдоль волокон, МПа
	с. ш.	в. д.		
<i>Сосна лапландская</i>				
Ленинградский	61	34	474 ± 28	41 ± 2
Архангельский	62	43	490 ± 21	47 ± 3
<i>Среднее</i>	61–62	34–43	483 ± 16	44 ± 2
<i>Сосна европейская западная</i>				
Вологодский	59	40	415 ± 9	39 ± 1
Эстонский	58	27	521 ± 16	49 ± 2
Латвийский	57	22	503 ± 11	47 ± 2
Витебский	55	29	509 ± 11	49 ± 1
Минский	54	27	459 ± 10	42 ± 1
Гродненский	53	24	509 ± 17	46 ± 2
<i>Среднее</i>	53–59	22–40	489 ± 9	46 ± 1
<i>Сосна европейская восточная</i>				
Ульяновский	54	48	497 ± 30	46 ± 4
Башкирский	54	58	530 ± 7	50 ± 2
<i>Среднее</i>	54	48–58	516 ± 13	48 ± 2
<i>Среднее по европейской сосне</i>	53–59	22–58	497 ± 8	47 ± 1
<i>Сосна лесостепная</i>				
Белгородский	51	38	489 ± 44	40 ± 8
Курский	51	34	397 ± 7	32 ± 1
Волгоградский	51	42	550 ± 19	54 ± 3
Хмельницкий	50	27	452 ± 6	42 ± 1
Полтавский	49	33	424 ± 11	36 ± 1
Ростовский	47	40	499 ± 14	48 ± 2
<i>Среднее</i>	47–51	27–42	464 ± 12	42 ± 2
<i>Сосна сибирская</i>				
Томский	57	85	423 ± 30	33 ± 4

Из приведенных данных (табл. 5) видно, что в некоторых случаях средние показатели по подвидам перекрываются доверительными интервалами, т. е. допускают гипотезу о том, что средние относятся к одной и той же совокупности. Для проверки данной гипотезы рассчитан параметрический критерий – t-критерий (табл. 6). Если вероятность отнесенности значения к одной и той же совокупности ниже уровня значимости $p < 0,05$, то выборки относятся к двум разным совокупностям.

Таблица 6

Фактический t-критерий различия по плотности и прочности древесины для подвидов сосны обыкновенной
Values of actual t-tests difference among Scots pine subspecies according to the density and strength of the wood

Подвид	Лапландская	Европейская	Лесостепная
<i>Плотность древесины при 12%-й влажности</i>			
Лапландская		0,098	0,055
Европейская	0,098		0
Лесостепная	0,055	0	
Сибирская	0,001	0	0,015
<i>Прочность древесины на сжатие вдоль волокон</i>			
Лапландская		0,050	0,101
Европейская	0,050		0
Лесостепная	0,101	0	
Сибирская	0	0	0
<i>Прочность древесины на статический изгиб</i>			
Лапландская		0,055	0,821
Европейская	0,055		0,058
Лесостепная	0,821	0,058	
Сибирская	0,091	0,024	0,113

Анализируя данные табл. 6, можно сделать вывод, что полученные средние значения плотности древесины сосны по подвидам для сосны лапландской достоверно не отличаются от аналогичных показателей сосен европейской и лесостепной ($t_{\text{факт}} = 0,098$ и $0,055$ соответственно). Схожая ситуация наблюдается при сравнении прочностных показателей древесины при сжатии вдоль волокон ($t_{\text{факт}} = 0,050$ и $0,101$ соответственно). Достоверных различий для прочности древесины при статическом изгибе по подвидам также не установлено, несмотря на имеющуюся наибольшую разницу у лапландской и лесостепной ($t_{\text{факт}} = 0,821$) и лесостепной и сибирской ($t_{\text{факт}} = 0,113$) сосен.

Заключение

Подводя итоги исследования по выявлению различий физико-механических свойств древесины сосны (плотность в абсолютно сухом состоянии и при 12%-й влажности, прочность при сжатии вдоль волокон, прочность при статическом изгибе) 17 различных климатипов, следует отметить, что в большинстве случаев достоверность различий сравниваемых показателей между древесиной

разных климатипов не выявлена. Практически аналогичная ситуация прослеживается и при сравнении свойств древесины различных подвидов сосны, выделенных Л.Ф. Правдиным. Это, скорее всего, обусловлено тем, что древесина, имея растительное происхождение, обладает довольно высокой изменчивостью свойств, на которые влияет ее возраста, условия произрастания, наследственные особенности и другие факторы, проявляющихся в процессе роста дерева. Следует отметить, что большинство исследователей указывают на значительную изменчивость свойств древесины в пределах породы.

О характере изменчивости показателей некоторых свойств древесины можно судить по коэффициенту вариации (изменчивости). Наименьшая изменчивость в пределах породы характерна для плотности древесины и составляет 2,8–10,2 %. Для прочности при сжатии вдоль волокон изменчивость варьирует в пределах от 4,8 до 20,6 %, для прочности при статическом изгибе – от 2,7 до 21,7 %.

Можно предположить, что для достижения приемлемого уровня достоверности различия изучаемых показателей требуется бесконечно большое количество испытаний образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кушченко И.Т. Рост и развитие аборигенных и интродуцированных видов семейства *Pinaceae* Lindl. в условиях Карелии. Петрозаводск: ПетрГУ, 2000. 214 с.
Kishchenko I.T. *Growth and Development of Native and Introduced Species of the Family Pinaceae Lindl. in the Conditions of Karelia*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2000. 214 p. (In Russ.).
2. Кузьмин С.Р. Реакция ширины годичного кольца и доли поздней древесины у сосны обыкновенной на погодные условия в географических культурах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 64–80.
Kuzmin S.R. Response of Annual Ring Width and Latewood Content of Scots Pine to Weather Conditions in Provenance Trials. *Lesnoy zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 5, pp. 64–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-64-80>
3. Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А. Морфологические особенности хвои у сосны обыкновенной с разной устойчивостью к грибным болезням // Экология. 2015. № 2. С. 156–160.
Kuzmin S.R., Kuzmina N.A. Morphological Distinctions of Needles in Scots Pine with Various Resistance Levels to Fungal Diseases. *Ekologia* = Russian Journal of Ecology, 2015, no. 2, pp. 156–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0367059715010084>
4. Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А., Ваганов Е.А. Динамика роста сосны обыкновенной в географических культурах // Лесоведение. 2013. № 1. С. 30–38.
Kuzmin S.R., Kuzmina N.A., Vaganov E.A. Growth Dynamics of Scots Pine in Provenance Trial Plantations. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2013, no. 1, pp. 30–38. (In Russ.).
5. Кузьмин С.Р., Роговцев Р.В. Радиальный рост и доля поздней древесины у сосны обыкновенной в географических культурах в Западной и Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2016. № 6. С. 113–125.
Kuzmin S.R., Rogovtsev R.V. Radial Growth and Percent of Latewood in Scots Pine Provenance Trials in Western and Central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 6, pp. 113–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20160611>
6. Кузьмина Н.А., Кузьмин С.Р. Устойчивость сосны обыкновенной разного происхождения к грибным патогенам в географических культурах Приангарья // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 4-5. С. 454–461.
Kuzmina N.A., Kuzmin S.R. Resistance of Pine of Different Origin to Pathogenic Fungus in Geographical Cultures of Priangariye. *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2007, vol. 24, no. 4-5, pp. 454–461. (In Russ.).

7. Лазарева С.М. Рост боковых побегов и продолжительность жизни хвои видов *Picea* в Левобережном Заволжье // Хвойные бореальной зоны. 2014. Т. XXXII, № 5-6. С. 44–49.

Lazareva S.M. Growth of Side Shoots and Life of Needles on the Left Bank of *Picea* in the Middle Volga. *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2014, vol. 32, no. 5-6, pp. 44–49. (In Russ.).

8. 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. *Pine Wood Quality in Plantations*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2003. 110 p. (In Russ.).

9. Мельник П.Г., Савосько С.В., Станко Я.Н., Дюжина И.А., Степанова О.В. Географическая изменчивость продуктивности и физико-механических свойств древесины сосны обыкновенной // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2007. № 6. С. 33–38.

Melnik P.G., Savosko S.V., Stanko Ya.N., Dyuzhina I.A., Stepanova O.V. Geographical Variability in Productivity and Physical-Mechanical Properties of Scots Pine Wood. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2007, no. 6, pp. 33–38. (In Russ.).

10. Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Мельник П.Г. Результаты выращивания провениенций сосны обыкновенной в географических посадках Серебряноборского опытного лесничества // Лесоведение. 2017. № 3. С. 176–182.

Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B., Melnik P.G. Growing Geographic Trial Provenances of the Scots Pine in Serebryany Bor Forestry. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2017, no. 3, pp. 176–182. (In Russ.).

11. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Чупров А.В., Беляев В.В. Реакция роста сосны обыкновенной на климатические изменения в широтном градиенте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 82–93.

Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Chuprova A.V., Belyaev V.V. Growth Response of Scots Pine to Climate Change in the Latitudinal Gradient. *Lesnoy zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 5, pp. 82–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.82>

12. Пауль Э.Э., Звягинцев В.Б. Древесиноведение с основами лесного товароведения. Минск: БГТУ, 2015. 315 с.

Paul E.E., Zvyagintsev V.B. *Wood Science with the Fundamentals of Forest Commodity Science*. Minsk, BGTU Publ., 2015. 315 p. (In Russ.).

13. Пахарькова Н.В., Кузьмина Н.А., Кузьмин С.Р., Ефремов А.А. Морфофизиологические особенности хвои у разных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 1. С. 107–113.

Pakharkova N.V., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Efremov A.A. Morphophysiological Traits of Needles in Different Climatotypes of Scots Pine in Provenance Trial. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 107–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1995425514010107>

14. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 192 с.

Pravdin L.F. *Scots Pine. Variability, Intraspecific Systematics and Breeding*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 192 p. (In Russ.).

15. Ребко С.В., Мельник П.Г., Ламоткин С.А., Турик П.В., Поплавская Л.Ф., Носников В.В. Анализ содержания основных компонентов эфирного масла в хвое различных климатипов и подвидов сосны обыкновенной // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 3. С. 17–36.

Rabko S.U., Melnik P.G., Lamotkin S.A., Tupik P.V., Paplauskaya L.F., Nosnikau V.V. Content Analysis of Essential Oil Main Components in the Needles of Various Provenances and Subspecies of Scots Pine. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 17–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5783>

16. Ребко С.В., Поплавская Л.Ф. Сравнительная характеристика роста географических культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Прилож. к журн. «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». Ч. 1. Сер.: Биологич. науки; мед. науки. 2008. С. 231–236.

Rabko S.U., Paplavuskaya L.F. Comparative Characteristic of Growth for Geographic Cultures of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Supplement to the journal «Vesci Natsyanal'nai akademii nauk Belarusi»*. Part 1. Series: Biological Sciences, Medical Sciences. 2008, pp. 231–236. (In Russ.).

17. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Особенности адаптации разных форм сосны обыкновенной в условиях длительного избыточного увлажнения почв // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 30–44.

Tarkhanov S.N., Pinayevskaya E.A., Aganina Yu.E. Features of Adaptation of Different Forms of Scots Pine Under Conditions of Prolonged Excessive Soil Moistening. *Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 2, pp. 30–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-30-44>

18. Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Дроздов И.И., Мелехов В.И. Плотность древесины сосны обыкновенной в различных условиях произрастания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 56–64.

Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Drozdov I.I., Melekhov V.I. Wood Density of Scots Pine in Different Growth Conditions. *Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 6, pp. 56–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.56>

19. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с. Ugolev B.N. *Wood Science and Forestry Commodity Science*. Moscow, MSFU Publ., 2007. 351 p. (In Russ.).

20. Федоров Н.И., Пауль Э.Э. Древесиноведение и лесоматериалы. Минск: БГТУ, 2006. 292 с.

Fedorov N.I., Paul E.E. *Wood Science and Timber Products*. Minsk, BG TU Publ., 2006. 292 p. (In Russ.).

21. Auty D., Achim A., Macdonald E., Cameron A.D., Gardiner B.A. Models for Predicting Wood Density Variation in Scots Pine. *Forestry*, 2014, vol. 87, no. 3, pp. 449–458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>

22. Guller B., Isik K., Cetinay S. Variations in the Radial Growth and Wood Density Components in Relation to Cambial Age in 30-Year-Old *Pinus brutia* Ten. at Two Test Sites. *Trees*, 2012, vol. 26, no. 3, pp. 975–986. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0675-2>

23. Niemi P., Sonderegger W. *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Switzerland, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG Publ., 2017. 580 p. (In German).

24. Pásztor Z., Mohácsiné I.R., Börcsök Z., Gorbacheva G. The Utilization of Tree Bark. *Bioresources*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 7859–7888. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3>

25. Peltola H., Gort J., Pulkkinen P., Gerendai A.Z., Karppinen J., Ikonen V.-P. Differences in Growth and Wood Density Traits in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Genetic Entries Grown at Different Spacing and Sites. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 3, pp. 339–354. <https://doi.org/10.14214/sf.192>

26. Sattler D.F., Finlay C., Stewart J.D. Annual Ring Density for Lodgepole Pine as Derived from Models for Earlywood Density, Latewood Density and Latewood Proportion. *Forestry*, 2015, vol. 88, no. 5, pp. 622–632. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv030>

27. Zabuga V.F., Zabuga G.A. Specific Features of the Growth of Scots Pine Vegetative Organs in the Forest-Steppe Zone of Cisbaikalia. *Russian Journal of Ecology*, 2007, vol. 38, no. 6, pp. 409–416. <https://doi.org/10.1134/S1067413607060021>

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 582.475(470.21)

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-41-57

Интродукция кедра и лиственницы в условиях Кольского Заполярья

Л.Г. Исаева[✉], канд. с.-х. наук, доц., вед. науч. сотр.; ResearcherID: [J-1791-2018](https://orcid.org/0000-0003-4636-112X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4636-112X>

В.В. Ершов, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [S-4439-2018](https://orcid.org/0000-0002-0455-724X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0455-724X>

Г.П. Урбанавичюс, канд. геогр. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [T-8260-2017](https://orcid.org/0000-0003-3222-5151),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3222-5151>

Е.А. Боровичев, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [U-9117-2017](https://orcid.org/0000-0002-7310-6872),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7310-6872>

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, Академгородок, д. 14 а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; l.isaeva@ksc.ru[✉], slavo91@gmail.com, g.urbanavichus@ksc.ru, e.borovichev@ksc.ru

Поступила в редакцию 23.04.21 / Одобрена после рецензирования 03.08.21 / Принята к печати 08.08.21

Аннотация. Цель – изучить историю создания и произрастания интродуцентов *Pinus sibirica* Du Tour и *Larix sibirica* Ledeb. в Мурманской области и их состояние на особо охраняемых природных территориях. Кедр сибирский в Заполярье впервые обнаружен в 1911 г., лиственница сибирская – в 1925 г. Посевы кедра и лиственницы на территории региона активно производились в 1930-е и 1950–60-е гг. Многие участки с кедром и лиственницей охраняются как памятники природы регионального значения. Рассмотрено состояние кедров и лиственниц на землях 9 памятников природы регионального значения и Лапландского государственного природного биосферного заповедника. Исследуемые породы занимают здесь площадь примерно 70 га. Сделан сплошной или выборочный пересчет деревьев и подростов с измерением высоты и диаметра. Высота исследуемых кедров варьирует от 0,02 до 18,00 м, лиственниц – от 0,01 до 18,00 м; диаметр кедров находится в диапазоне 0,3...31,7 см, лиственницы – 0,4...38,3 см. Показано, что хвойные интродуценты хорошо акклиматизировались в природных условиях Арктики, увеличивают биоразнообразие лесных экосистем и повышают их эстетичность. В условиях Кольского Севера кедр сибирский и лиственница сибирская плодоносят, идет естественное возобновление. Рекомендуется регулярно следить за состоянием кедра сибирского и лиственницы сибирской, произрастающих здесь, проводить необходимый уход. При включении участков с произрастанием исследованных видов в особо охраняемую природную территорию необходимо изучать их состояние, местоположение, доступность, целенаправленность использования. Оценка эффективности существующих лесных памятников природы позволит более рационально подойти к сохранению для Заполярья ценных древесных пород кедра и лиственницы.

Ключевые слова: сосна сибирская, лиственница сибирская, интродукция, хвойные интродуценты, состояние интродуцентов, Мурманская область, особо охраняемые природные территории

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания по теме «Биоразнообразие и мультифункциональность наземных экосистем Евро-Арктического региона» FMEZ-2022-0021 (НИОТКР № 122022400120-2).

© Исаева Л.Г., Ершов В.В., Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А., 2023

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

Для цитирования: Исаева Л.Г., Ершов В.В., Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А. Интродукция кедра и лиственницы в условиях Кольского Заполярья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 41–57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-41-57>

Original article

Introduced Species of Cedar and Larch in the Climate Conditions of the Kola Arctic Region

Ludmila G. Isaeva[✉], Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Senior Research Scientist; ResearcherID: [J-1791-2018](https://orcid.org/0000-0003-4636-112X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4636-112X>

Vyacheslav V. Ershov, Junior Research Scientist; ResearcherID: [S-4439-2018](https://orcid.org/0000-0002-0455-724X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0455-724X>

Gennadii P. Urbanavichus, Candidate of Geography, Senior Research Scientist; ResearcherID: [T-8260-2017](https://orcid.org/0000-0003-3222-5151), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3222-5151>

Eugene A. Borovichev, Candidate of Biology, Senior Research Scientist; ResearcherID: [U-9117-2017](https://orcid.org/0000-0002-7310-6872), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7310-6872>

Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the RAS, ul. Akademgorodok, 14a, Apatity, Murmansk Region, 184209, Russian Federation; l.isaeva@ksc.ru[✉], slavo91@gmail.com, g.urbanavichus@ksc.ru, e.borovichev@ksc.ru

Received on April 23, 2021 / Approved after reviewing on August 03, 2021 / Accepted on August 08, 2021

Abstract. The purpose of this study was to investigate the history of growth of the introduced species *Pinus sibirica* Du Tour and *Larix sibirica* Ledeb. in the Murmansk region and their state in natural areas of preferential protection. The first finds of Siberian cedar in the Arctic region were recorded in 1911, and Siberian larch in 1925. In the 1930s and 1950s–1960s, these kinds of trees were extensively cultivated in the region. Many cedar and larch growth areas are protected as natural monuments of regional significance. Currently, there are eight natural monuments with Siberian cedar growing on the territory of the Murmansk region and seven natural monuments with Siberian larch. The condition of the trees in the territories under preferential protection and the Lapland State Natural Biosphere Reserve was studied in detail. The invasive species occupy a territory of about 70 ha. It was a complete or random enumeration of the trees and undergrowth with measurements of height and diameter. Siberian cedar ranged in height from 0.02 to 18.00 m, whereas Siberian larch was between 0.01 and 18.00 m. Cedar diameters varied from 0.3 to 31.7 cm, whereas larch diameters ranged from 0.4 to 38.3 cm. It is shown that coniferous introduced species are well acclimatized to the natural conditions of the Arctic, which increases the biodiversity of ecosystems and aesthetic perception. *Pinus sibirica* Du Tour and *Larix sibirica* Ledeb. fructify in the conditions of the Kola Arctic region that is a sign of a natural regeneration. It is recommended to monitor the conditions of the plantations on a regular basis in order to provide appropriate care. With the inclusion of plots with the growth of the studied species in natural areas of preferential protection, it is necessary to study their condition, location, accessibility, and targeted application. Evaluation of the effectiveness of existing forest management system will allow a more rational approach to the conservation of valuable cedar and larch tree species in the Arctic region.

Keywords: Siberian pine, Siberian larch, adaptation, coniferous introduced species, condition of introduced species, Murmansk region, natural areas of preferential protection



Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the State Assignment "Biodiversity and Multifunctionality of Terrestrial Ecosystems in the Euro-Arctic Region", FMEZ-2022-0021 (R&D No. 122022400120-2).

For citation: Isaeva L.G., Ershov V.V., Urbanavichus G.P., Borovichev E.A. Introduced Species of Cedar and Larch in the Climate Conditions of the Kola Arctic Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 41–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-41-57>

Введение

Мурманская область почти полностью расположена севернее Полярного круга, но влияние Северо-Атлантического теплого течения определяет мягкость климата [29] и развитие бореальных типов растительности [22]. Основные лесообразующие породы – ель *Picea obovata* Ledeb., сосна *Pinus sylvestris* L. и береза *Betula pendula* Roth. Лиственница сибирская *Larix sibirica* и сосна сибирская *Pinus sibirica* в Мурманской области являются хвойными интродуцентами. В связи с этим изучение аспектов интродукции сосны сибирской и лиственницы сибирской в регионе актуально. Сам факт существования и хорошего развития сибирского кедра и лиственницы в условиях Заполярья, в местах, удаленных от естественного ареала, представляет большой практический и теоретический интерес.

Лесная интродукция способствует эволюции вида, расширяет ареал его распространения, обогащает видовой состав лесных фитоценозов. В 30-е гг., конце 50-х и начале 60-х гг. прошлого столетия интродукция древесных пород была признана задачей народохозяйственного уровня [6].

Сосна сибирская кедровая (кедр сибирский) *Pinus sibirica* DuRoi с ареалом в восточной части Европейской России, на Урале, в Сибири образует леса, выполняющие важную экосистемную роль. Благодаря совокупности полезных свойств кедр сибирский является одним из старейших интродуцентов в европейской части России [1] и северных странах [30, 35, 36, 42, 44]. Интродукция сосны сибирской за пределы ареала увеличивает биоразнообразие экосистем, с учетом ее декоративности и орехоносного значения позволяет существенно расширить список лесных пользований [6, 7, 24]. Важные биологические особенности сосны сибирской – зимостойкость, дымоустойчивость, высокие адаптивные возможности [9]. Данный вид древесной породы относится к теневыносливым, значительно превосходя сосну обыкновенную. Вид предпочитает суглинистые и супесчаные, достаточно увлажненные, хорошо дренированные плодородные почвы.

Лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb. естественно произрастает в основном в Сибири и на Дальнем Востоке, встречается на Урале и северо-востоке Европейской России [8]. На Европейском Севере России естественные лиственничники произрастают в Архангельской, Вологодской областях, Республиках Коми и Карелии [12, 13, 27, 31]. По данным палеоботанических исследований, в раннем голоцене лиственница была распространена как в европейской части России, так и в Финляндии и Швеции [36–38, 45]. Лиственница сибирская, выращенная из семян, завезенных из России, активно культивируется в Финляндии [39]. Это светолюбивая древесная порода. Лиственница образует редкостойные светлые леса, чистые и смешанные насаждения, легко переносит суровые условия, на севере ее ареал простирается до тундры, а в горах поднимается до верхней границы леса. Древесина лиственницы сибирской высоко ценится и имеет практическое применение в народном хозяйстве не только в России, но и за рубежом [32, 40–42]. В Финляндии лиственница считается эквивалентной

сосне шотландской по устойчивости к гниению [43]. Лиственница часто используется в озеленении северных городов и населенных пунктов [4, 5].

Цель работы – обзор истории создания лесных культур сосны сибирской и лиственницы сибирской на территории Мурманской области и выполнение инвентаризации этих экзотов на особо охраняемых природных территориях (ООПТ).

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили сосна сибирская и лиственница сибирская искусственного происхождения на территории Мурманской области. Осуществлен обзор истории создания лесных культур данных пород, их распространение в регионе.

Полевые исследования состояния древесных пород выполнены на землях ООПТ: 9 памятников природы (ПП) регионального значения и Лапландского государственного природного биосферного заповедника (табл. 1, см. рисунок). Лапландский природный заповедник образован в 1930 г. Ботанические лесные ПП были созданы решением Мурманского облисполкома № 537 от 24.12.1980 г. и № 24 от 15.01.1986 г. как успешный опыт внедрения древесных пород, нехарактерных для Кольского полуострова и имеющих большое значение в условиях Заполярья.

При обследовании участков с произрастанием сибирского кедра и лиственницы сибирской сделан сплошной или выборочный пересчет деревьев и подростов с измерением высоты и диаметра (на высоте 1,3 м) стандартными методами. Рассчитывая средние показатели, учитывали только живые растения.

Результаты исследования и их обсуждение

Кедр сибирский. Первые сведения о произрастании сибирского кедра в мурманском Заполярье были опубликованы русским геоботаником Р. Поле в 1913 г., кедры обнаружены на границе с Норвегией, в тундре у местечка Борис и Глеб. Летом 1911 г. молодые кедры найдены рядом с д. Кандалакшей, на безлесной вершине г. Крестовой [9]. В 1926 г. кедры обнаружены в окрестностях г. Колы [18]. Г.И. Нестерчук [20] также сообщает о произрастании кедров у г. Колы (южный склон холма восточного берега Кольского залива), по его предположению, вид был случайно занесен человеком примерно в 1850-х гг., когда военные суда стали заходить в Кольский залив.

Учитывая неприхотливость сибирского кедра к полярным условиям и в целях обогащения обедненной флоры Мурманского Заполярья в конце 1920-х гг. организован посев кедра сибирского в некоторых лесных массивах лесничеств Нотозерного (г. Кола), Имандровского (железнодорожная станция Хибины) и Кандалакшского (железнодорожная станция Кандалакша) [20]. В районе железнодорожной станции Хибины с 1923 до 1970-х гг. находилась Полярная опытная станция (ПОСВИР), рядом с центральной усадьбой станции в 1930-х гг. располагалось Имандровское лесничество. Вероятно, лесничество имело питомник древесно-кустарниковых пород, где выращивались кедры и лиственницы из семян, полученных из Сибири [15], затем саженцы этих древесных пород высаживали в районе расположения опытной станции и у подножия горного массива Хибины. Об этих кедрах сообщает также И.К. Тихомиров [23]. В настоящее время возле домов и вдоль основной дороги ст. Хибины произрастают «старовозрастные» кедры с диаметром ствола более 30 см.

Таблица 1

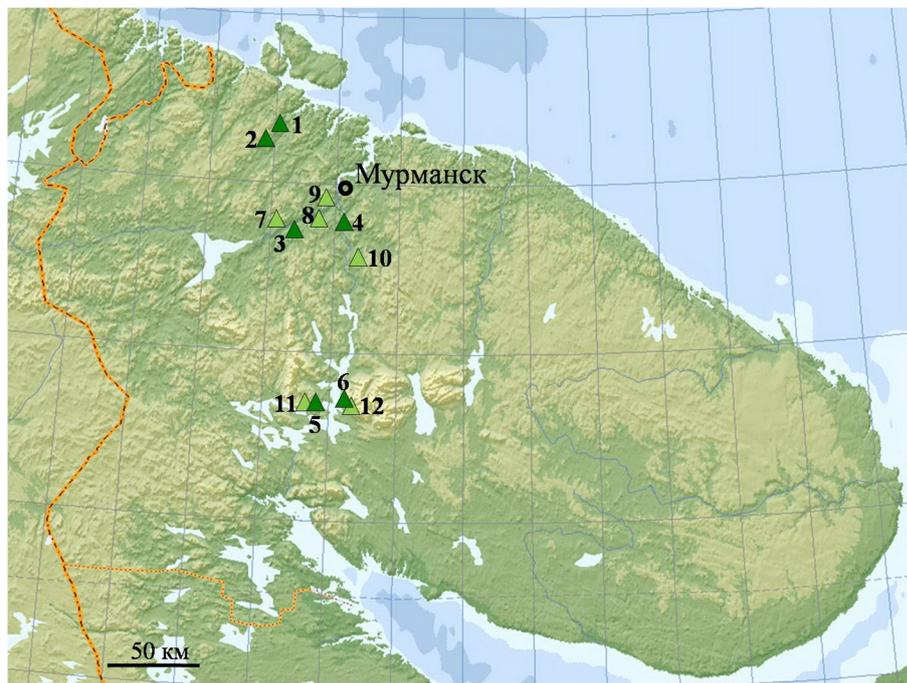
Особо охраняемые природные территории с посевами кедра и лиственницы
The natural areas under preferential protection of cedar and larch

№	ООПТ, лесничество	Площадь, га	Год		Назначение ООПТ	Кол-во экзотов, шт.	Год учета
			посева	создания ООПТ			
1	ПП «Кедры на реке Западная Лица», Туломское участковое лесничество	3,0	1944	1980	Уникальное научное, учебно-просветительское, культурно-историческое значение	>100	2019
2	ПП «Кедры урочища Окуновое», территория Госземфонда (нелесные земли)	20,0	1944*		Уникальное научное, культурно-историческое значение	>50	
3	ПП «Кедры лесного кордона Кривец», Мурманское участковое лесничество	2,0	1958	1986	Селекционное, научно-просветительское, рекреационное значение	> 1500	2019
4	ПП «Участок кедра искусственного происхождения», Пригородное участковое лесничество	0,4	1955	1986	Научное, учебно-просветительское, рекреационное значение	> 500	
5	Кедр сибирский на территории Лапландского заповедника	1,6	1956	1930	Научное, познавательное, эколого-просветительское значение	>700	1996
6	Кедр сибирский на территории Лапландского заповедника	0,4				> 400	1997
7	ПП «Кедры и лиственницы возле станции Хибинь», Кировское участковое лесничество	2,0	1932–1935	1980	Научно-познавательное, учебно-просветительское, средообразующее, рекреационное значение	28	2017

Окончание табл. 1

№	ООПТ, лесничество	Площадь, га	Год		Назначение ООПТ	Кол-во экзотов, шт.	Год учета
			посева	создания ООПТ			
8	ПП «Лиственницы Нижне-Тулomsкого водохранилища», Мурманское участковое лесничество	4,0	1953		Селекционное, научно-просветительское, рекреационное значение	> 1500	2019
9	ПП «Участок лесных культур лиственницы сибирской», Пригородное участковое лесничество, р-н аэропорта г. Мурманска	5,6	1954	1986	Научное, культурно-историческое, рекреационное значение	> 1000	
10	ПП «Участок лиственницы сибирской искусственного происхождения», Туломское участковое лесничество	0,9	1966		Научное, учебно-просветительское, рекреационное значение	> 80	
11	ПП «Лиственничная роща Тайболы», Тайбольское участковое лесничество	2,0	1932	1980	Селекционное, научно-просветительское, рекреационное значение	> 700	1997
12	Лиственница сибирская на территории Лапландского заповедника	0,4	1938	1930	Научное, познавательное, эколого-просветительское значение	> 40	

* Предполагаемая дата начала произрастания кедра сибирского.



Расположение ООПТ с лесными культурами кедра и лиственницы
(номера ООПТ соответствуют номерам в табл. 1)

Location of Specially Protected Natural Territories (SPNT) with cedar and larch
forest crops (SPNT numeration corresponds to the numeration in tabl. 1)

Известно, что в 1950–1960-х гг. по всей Мурманской области на общей площади 500 га, на гарях и вырубках, кедр сибирский высаживался лесхозами как вид-интродуцент [15]. В настоящее время многие участки произрастания кедра сибирского искусственного происхождения включены в лесные ботанические ПП регионального значения.

Самый северо-западный участок с кедром сибирским выявлен в Печенгском районе, на смежной с государственным природным заповедником «Пасвик» территории (п. Раякоски и в окрестностях п. Янискоски), где обнаружено 2 дерева кедра сибирского, высотой около 2 м [14], а самый северный – ПП «Кедры Западной Лицы». Самая восточная точка посадок кедра в Мурманской области находится в районе р. Кульйок – северного притока Поноя, на 137 км 509-й стройки Министерства внутренних дел 1950-х гг. железной дороги Титан–Йоканьга [15]. Н.С. Парфентьева [21] и Е.Г. Воробьева [3] дают описание местонахождений кедров в южной части региона – на островах Кандалакшского залива Белого моря: о. Головин (обнаружен в 1937 г.), о. Лодейный, о. Вороний, о. Куричек (пробный посев 1956 г.), также были найдены единичные кедров в 1970-х гг. на о. Большом Седловатом в Порьей губе и на Ковдском полуострове. Отдельная информация о местонахождении и состоянии некоторых деревьев сибирского кедра в Мурманской области содержится в работах Т.П. Некрасовой [19], Е.А. Черкизова [28], М.Л. Раменской [22], Л.А. Казакова [11].

В 2017 и 2019 гг. нами были проведены научно-исследовательские работы по инвентаризации кедра сибирского на территории ПП. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика таксационных показателей кедров сибирского и лиственницы сибирской на ООПТ
 Characteristics of Siberian cedar and Siberian larch taxation indicators in SPNT

ООПТ	Состав древостоя	Возраст (в год учета), лет	Кол-во учетных деревьев, шт.	Среднее	
				минимум–максимум	диаметр, см
<i>Кедр сибирский</i>					
ПП «Кедр на реке Западная Лица»	9Б1С+К	75	82	$9,9 \pm 0,36$	$15,9 \pm 0,79$
				3,2–16,0	4,8–31,3
ПП «Кедр урочища Окуневое»	10Б+К ед. С	61	31	$9,0 \pm 0,58$	$16,7 \pm 1,33$
				5,0–18,0	4,5–31,7
ПП «Кедр лесного кордона Кривец»	5К3С2Б ед. Е	64	110	$7,5 \pm 0,36$	$9,0 \pm 0,50$
				0,5–16,0	0,26–21,4
ПП «Участок кедр искусственного происхождения»	7С3Б+Е	63	132	$9,7 \pm 0,27$	$9,4 \pm 0,30$
				2,2–16,0	1,2–18,0
Кедр сибирский на территории Лапландского заповедника	5С2К3Б	~ 85	670	$0,7 \pm 2,08$	$4,9 \pm 0,12^*$
				0,8–3,6	0,8–20,0
Кедр сибирский на территории Лапландского заповедника	4С2Е2К2Б	66	383	$1,1 \pm 3,71$	$7,3 \pm 0,21^*$
				0,2–4,5	1,0–27,0
ПП «Кедр и лиственницы возле станции Хибинь»	2К1Ли4С2Ос1Б	65	28	$10,5 \pm 0,52$	$16,1 \pm 1,13$
				3,3–14,5	3,0–26,0
<i>Лиственница сибирская</i>					
ПП «Лиственницы Нижне-Туломского водохранилища»	7Ли3С+Б	66	100	$12,2 \pm 0,26$	$15,6 \pm 0,53$
				4,5–16,0	3,2–27,9
ПП «Участок лесных культур лиственницы сибирской»	8Ли2С+Б	65	124	$10,6 \pm 0,38$	$14,1 \pm 0,71$
				0,85–17,5	0,4–28,8

Окончание табл. 2

ООПТ	Состав древостоя	Возраст (в год учета), лет	Кол-во учетных деревьев, шт.	Среднее минимум–максимум	
				высота, м	диаметр, см
ПП «Участок лиственницы сибирской искусственного происхождения»	7Б2Лп1С ед. Е	53	83	$8,2 \pm 0,41$	$10,1 \pm 0,76$
				1,3–15,0	0,4–26,2
ПП «Лиственничная роща Тайболы»	9Лп1С+Б	87	250	$11,5 \pm 0,20$	$15,9 \pm 0,45$
				5,0–17,0	4,5–37,9
Лиственница сибирская на территории Лапландского заповедника		59	28	$12,7 \pm 0,40$	$19,3 \pm 0,75$
				7,0–15,0	10,0–24,0
	самосев		6	$2,4 \pm 0,48$	$5,0 \pm 1,01$
				1,3–4,5	3,0–8,0
			16	$0,4 \pm 0,05$	–**
				0,11–0,9	
ПП «Кедры и лиственницы возле станции Хибинь»		~ 85	4	$15,6 \pm 0,80$	$31,5 \pm 4,57$
				14,5–18,0	18,6–38,3
	самосев		16	$3,7 \pm 0,55$	$2,5 \pm 0,55$
				1,4–8,5	0,2–6,7
			95	$0,3 \pm 0,03$	–
				0,01–1,2	

* Окружность у шейки корня. ** Измерения не проведены.

ПП «Кедры Западной Лицы», «Кедры урочища Окуневое». Участки с сибирским кедром на данных территориях представляют особую природную и историческую ценность. В газете «Правда» от 25 января 1970 г. корреспондент М. Битюцкий в статье «Растут в Заполярье кедры» сообщает, что на Богатырь-горе (вблизи Кольского залива) на сопках, скалах и валунах растет более 100 деревьев сибирского кедра [9]. В апреле–мае 1944 г. кедры на площадях этих ПП выросли из орешков, оброненных советскими солдатами Сибирской дивизии. До сих пор сохранились созданные военными укрытия, рядом с которыми растут кедры. Л.И. Крестьяшин [16] называет это место самой северной территорией произрастания кедра сибирского в европейской части России. Кедры располагаются куртинами и одиночно. В настоящее время возраст крупных кедров составляет 75–76 лет. Некоторые деревья плодоносят. Максимальный диаметр кедров – 31,7 см, максимальная высота – 18 м. В результате произрастания в суровых климатических условиях 22 % кедров имеют морозобойные трещины ствола.

ПП «Кедры лесного кордона Кривец». Сосна сибирская здесь растет рядами. Самые крупные деревья кедра имеют диаметр от 18,5 до 21,4 см, высоту – от 14 до 16 м. В одном посадочном месте (гнезде) располагается от 1 до 6 деревьев. Факт произрастания в одном гнезде нескольких кедров различной высоты и диаметра (обычно 1–2 крупных и несколько мелких) можно объяснить тем, что семена (орешки) при посеве закладывались в землю без предварительной стратификации. Кроме того, семена сибирского кедра обладают свойством длительного семенного покоя. Также отмечено, что у сибирского кедра могут укореняться нижние ветки [9], т. е. возможно размножение вегетативным путем. Некоторые кедры плодоносят.

ПП «Участок кедра искусственного происхождения». Посев семян кедра был осуществлен на старой гари (пожар 1925 г.) рядами в площадки размером 1×1 м. Диаметр крупных деревьев кедра варьирует от 14 до 18 см, высота – от 10,5 до 16 м. Кедр плодоносит. В одном посадочном месте располагается от 1 до 10 кедров. Маленькие кедры, которые растут в одном гнезде с большими кедром, в основном засохли или усыхают в результате угнетения, происходит естественный отпад и формирование древостоя.

Кедр сибирский на территории Лапландского заповедника. Лесокультурные работы (посев семян кедра сибирского) на территории заповедника, по материалам «Летописи природы», проводились в 1939–1940 гг. сотрудниками заповедника и в 1955–1956 гг. – Лапландским лесничеством. Первые посевы кедра (1939–1940 гг.), выполненные по гари в долинах рр. Нявка и Чуна, не выжили, сеянцы погибли. В 1955–1956 гг. сосна сибирская была посеяна гнездовым способом на 2 участках площадью 1,6 и 0,4 га на южном склоне старой гари, размещение культур кедра 3×3 и 4×4 м соответственно. Лесные культуры обследованы в 1996–1997 гг. Учтено 670 (на площади 1,6 га) и 383 (0,4 га) живых кедра, высота которых варьировала от 8 до 355 см и от 2 до 450 см соответственно. Разницу по высоте можно объяснить посевом нестратифицированных семян, а также вегетативным размножением за счет укоренения нижних веток [3, 9].

ПП «Кедры и лиственницы возле станции Хибин». Сеянцы кедра и лиственницы были высажены в предгорье Хибин примерно в 1933–1935 гг. [15, 17, 23]. На момент создания ПП на площади 2 га произрастало 28 кедров.

В 2017 г. учтено 28 кедров (высотой от 3,3 до 14,5 м с диаметром ствола от 3 до 26 см). Кедр сибирский на территории ПП плодоносит (53,7 % от общего числа кедров на площади). Данный ПП часто посещается туристами и местным населением, имеет рекреационную нагрузку.

По результатам исследования кедр сибирского на 6 ООПТ можем сделать вывод, что состояние кедров удовлетворительное. Кедры, выросшие из семян на самой северной границе Кольского Заполярья, в настоящее время имеют возраст 77–78 лет. Идет формирование кедровников, почти на всех ООПТ кедры плодоносят. Семена кедр сибирского в условиях Крайнего Севера могут прорасти через десятки лет нахождения в почве. Также возможно вегетативное размножение кедр через укоренение нижних ветвей. Следует отметить, что многие жители региона высаживают на своих земельных участках кедр сибирский.

Лиственница сибирская. Первое упоминание о лиственнице на Кольском полуострове относится к 1925 г., когда лиственница высотой 3,5 м была найдена на юго-восточном побережье Кольского полуострова в месте под названием Вороньи сопки около с. Сосновка [27]. По современным данным эта лиственница засохла [34].

Первые культуры лиственницы на Кольском полуострове созданы в 1930-х гг. и представляли собой небольшие плантации вдоль железной дороги Санкт-Петербург–Мурманск. Семена лиственницы завозили в Мурманскую область из Сибири и с Дальнего Востока. Лиственницу стали планомерно высевать в разных частях Мурманской области, чтобы изучить приживаемость растения в европейской части России [25]. Имандровское лесничество, о котором было сказано выше, возможно, наравне с семенами кедр сибирского располагало семенами лиственницы: возле домов и вдоль основной дороги станции Хибинь сегодня произрастают «старовозрастные» лиственницы с диаметром ствола более 30 см. В 1950–1960-х гг. по всей Мурманской области на гари и вырубке лесхозами интродуцировалась лиственница сибирская – на 2000 га [15].

В настоящее время многие участки произрастания лиственницы сибирской искусственного происхождения, как и участки кедр сибирского, включены в лесные ботанические памятники природы регионального значения.

На восточном побережье Кольского полуострова в елово-березовом лесу около д. Пялица в 2015 г. обнаружена лиственница *Larix archangelica* P. Lawson высотой 9–10 м. Произрастание данной лиственницы на этом участке вызывает много вопросов [34]. Исследования лиственницы в Мурманской области также проведены нами в 2017 и 2019 гг. (табл. 2).

ПП «Лиственничная роща Тайболы». Данный ПП – один из первых опытов интродукции лиственницы сибирской в Мурманской области. Семена лиственницы были посеяны в 1932 г., в настоящее время образовалась лиственничная роща на площади 1,0 га [17]. При обследовании ПП в 2019 г. выявлено, что средний диаметр лиственниц составил 15,9 см, средняя высота – 11,5 м. Диаметр лиственниц варьирует от 4,5 до 37,9 см, высота – от 5,0 до 17,0 м. Средний диаметр самых крупных деревьев лиственницы – 24,0 см (от 18,0 до 37,9 см), средняя высота – 15,0 м (от 13,5 до 17 м). Все крупные лиственницы в хорошем состоянии, характеризуются как здоровые. Лиственницы растут рядами, более 700 шт., хорошо плодоносят, на территории ПП и рядом с ним много самосева, мелкого подростка лиственницы высотой от 3 до 40 см.

ПП «Лиственницы Нижне-Тулумского водохранилища». Посев семян лиственницы выполнен в 1953 г. на площади 4 га [17]. Обследованием 2019 г. выявлено, что средний диаметр лиственниц составил 15,6 см, средняя высота – 12,2 м. Диаметр варьирует от 3,2 до 27,9 см, высота – от 4,5 до 16,0 м. У крупных деревьев диаметр – от 18,5 до 27,9 см (среднее – 20,8 см), высота – от 14 до 15 м (среднее – 14,4 м). Лиственницы растут плотными, сильно загущенными рядами. Более 58 % лиственниц находятся в ослабленном состоянии в результате плотного расположения в рядах и междурядьях. Лиственница хорошо плодоносит, много самосева, в некоторых местах междурядья плотно заросли подростом лиственницы, который в результате загущенности находится большей частью в угнетенном и погибающем состоянии, характеризуется как мелкий и сломанный, его высота – до 2 м. Кроме лиственницы в подросте присутствуют сосна, ель и береза. Территория ПП – единственное место в регионе, где встречается редкий, внесенный в Красные книги Кировской, Челябинской, Свердловской областей, Пермского края, Республики Удмуртия [2] гриб *Boletinus asiaticus* Singer. Вероятно, споры гриба попали вместе с семенами лиственницы и в настоящее время гриб растет в северных условиях в искусственно созданном лиственничном лесу. В Финляндии гриб также отмечен как редкий микоризный вид под интродуцированной *Larix sibirica* [33].

ПП «Участок лесных культур лиственницы сибирской». Лиственницы растут рядами, хорошо плодоносят, идет активное естественное возобновление. Среди лиственничного древостоя встречаются крупные лиственницы от 18 до 28,8 см в диаметре, высотой до 17,7 м. В настоящее время ПП находится вблизи аэропорта г. Мурманска и проезд на данную территорию запрещен.

ПП «Участок лиственницы сибирской искусственного происхождения». Лиственницы распределены по площади хаотично. Крупные деревья имеют диаметр от 17,2 до 26,2 см, высоту – от 11 до 15 м. ПП в настоящее время находится в окрестностях г. Колы, рядом строится линия электропередачи, коттеджи, на территории ПП много троп.

Лиственница сибирская на территории Лапландского заповедника. На территории заповедника семена лиственницы сибирской были высеяны в 1938 г. в дендрологическом питомнике (площадь – 0,4 га) [10]. В 1997 г. в питомнике росли 28 крупных лиственниц, диаметром от 8 до 24 см. В условиях заповедника взрослые особи лиственницы сибирской обильно плодоносят, но семена имеют низкую всхожесть и возможность семенного размножения небольшая. Высота подроста лиственницы (самосев) составляла в 1997 г. от 11 до 90 см [10]. В настоящее время многие из этих сеянцев погибли, живых сеянцев осталось примерно 10–20 %. Всходы почти сразу погибают из-за неблагоприятных условий произрастания (захламливаемость сухими опавшими ветками, зарастание территории питомника ивой и др.) и новые почти не появляются или по истечении некоторого времени усыхают. Наблюдения за состоянием деревьев, появлением сеянцев и их ростом не проводятся. Дендропитомник посещают туристы. Обследование состояния лиственниц не выполнялось с 1997 г. Важно сделать повторное обследование состояния интродуцентов.

ПП «Кедры и лиственницы возле станции Хибинь». Сеянцы лиственницы были высажены около 1933–1935 гг. На момент создания ПП здесь произрастало 5 экземпляров лиственницы. В 2017 г. описано 3 крупных лиственницы, высотой

от 15 до 18 м, диаметром от 18,6 до 38,3 см, и 1 лиственница высотой 14,5 м и диаметром 18,6 см, а также 111 экз. подроста (самосев), высотой от 1 см до 8,5 м.

В настоящее время участки с произрастанием лиственницы сибирской находятся в основном в центральной и западной части Мурманской области. Лиственница сибирская хорошо акклиматизировалась и прижилась в Мурманской области, на участках с произрастанием этого интродуцента сформировались лиственничники, активно идет естественное возобновление. Лиственница в регионе высажена в городах и населенных пунктах для озеленения, вдоль автомобильных и железных дорог, в природных условиях при создании лесных культур [4, 11, 26 и др.]. Частное культивирование лиственницы незначительно, хотя многие жители региона высаживают на своих загородных участках лиственницу сибирскую.

Кедр сибирский. Лиственница сибирская.

Возникает вопрос об эффективности и использовании существующих ПП и выполнении ими функций с точки зрения научно-познавательной, исторической ценности, ознакомления с опытом создания лесных культур из интродуцентов и т. д. Как выяснилось в ходе исследования, не все ПП соответствуют целям, определенным при их создании. Например, вокруг ПП идет активное строительство коттеджей и линий электропередач, ценные деревья вырубаются («Участок лиственницы сибирской искусственного происхождения») или за лесными культурами нет ухода и, как следствие, насаждение сильно загущено, идет усыхание древостоя («Лиственницы Нижне-Тулумского водохранилища»). Некоторые ПП находятся далеко от основных дорог или в настоящее время проезд к этим территориям запрещен, поэтому возникают трудности с их посещением («Участок кедра искусственного происхождения», «Участок лесных культур лиственницы сибирской»).

Заключение

Исследование интродукции сосны сибирской (кедра сибирского) и лиственницы сибирской в Мурманской области показало, что эти древесные породы успешно акклиматизировались в условиях Заполярья и при благоприятных для них условиях произрастания вносят разнообразие в ландшафт региона.

В условиях Кольского Заполярья на небольших территориях сформированы новые типы растительных сообществ – кедровники и лиственничники. Кедр сибирский и лиственница сибирская плодоносят, идет естественное возобновление. Установлено, что семена кедра сибирского в условиях Крайнего Севера могут прорасти после нахождения в почве в течение десятков лет. Также возможно вегетативное размножение кедра через укоренение нижних ветвей.

При создании лесных памятников природы из лесных культур-интродуцентов необходимо чаще проводить оценку состояния древесных пород, соответствующий уход и следить за степенью соответствия целей создания особо охраняемой природной территории ее использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ageev A.B. Уникальность кедра сибирского и проблема сохранения его как биологического вида // Лесн. бюл. 2007. № 3. С. 22–25.

Ageev A.B. The Uniqueness of Siberian Cedar and the Problem of Preserving It as a Biological Species. *Lesnoi byulleten*, 2007, no. 3, pp. 22–25. (In Russ.).

2. Агеев Д.В., Бульонкова Т.М. Масленок азиатский (*Suillus asiaticus*) // Грибы Сибири. Режим доступа: <https://mycology.su/suillus-asiaticus.html> (дата обращения: 18.06.21).
Ageev D.V., Bulonkova T.M. Asian Oiler (*Suillus asiaticus*). *Mushrooms of Siberia*. Website.
3. Воробьева Е.Г. О произрастании кедр сибирского на островах Кандалакшского залива // Флора и растительность заповедников РСФСР: сб. науч. тр. М., 1981. С. 133–139.
Vorobyeva E.G. On the Growth of Siberian Stone Pine on the Islands of the Kandalaksha Bay. *Flora i rastitel'nost' zapovednikov RSFSR = Flora and Vegetation of the Reserves of the RSFSR*. Moscow, 1981, pp. 133–139. (In Russ.).
4. Гонтарь О.Б., Жиров В.К., Казаков Л.А., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н. Зеленое строительство в городах Мурманской области. Апатиты: Кольск. НЦ РАН, 2010. 292 с.
Gontar O.B., Zhiron V.K., Kazakov L.A., Svyatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N. *Amenity Planting in the Towns of the Murmansk Region*. Apatity, Kola SC RAS Publ., 2010. 292 p. (In Russ.).
5. Грибов С.Е., Карбасников А.А., Карбасникова Е.Б., Корчагов С.А. Оценка перспективности использования лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) в озеленении г. Вологды // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 95–106.
Gribov S.E., Karbasnikov A.A., Karbasnikova E.B., Korchagov S.A. Prospective Assessment of Siberian Larch (*Larix sibirica*) in the Landscaping of the City of Vologda. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 2, pp. 95–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.95>
6. Дроздов И.И. Интродукция ценного лесообразователя // Лесн. вестн. 1998. № 3. С. 99–103.
Drozdov I.I. Introduction of Valuable Forest-Forming Species. *Lesnoj vestnik*, 1998, no. 3, pp. 99–103. (In Russ.).
7. Дроздов И.И. Интродукция кедр сибирского в европейскую часть лесной зоны России. М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. № 3-4. 31 с.
Drozdov I.I. *Introduction of Siberian Cedar to the European Part of the Russian Forest Zone*. Moscow, Russian National Research and Information Centre for Forest Resources Publ., 1999, no. 3-4. 31 p. (In Russ.).
8. Дылис Н.В. Лиственница. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 96 с.
Dylis N.V. *Larch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 96 p. (In Russ.).
9. Игнатенко М.М. Сибирский кедр (биология, интродукция, культура) / отв. ред. Н.В. Ловелиус. М.: Наука, 1988. 160 с.
Ignatenko M.M. *Siberian Cedar (Biology, Adaptation, Cultivation)*. Ed by N.V. Lovelius. Moscow, Nauka Publ., 1988. 160 p. (In Russ.).
10. Исаева Л.Г. Хвойные интродуценты Лапландского заповедника // Проблемы сохранения биоразнообразия в наземных и морских экосистемах Севера: материалы науч. сессии. Апатиты. Кольск. НЦ РАН, 2001. С. 54–56.
Isaeva L.G. Coniferous Introducents of the Lapland Reserve. *Problems of Biodiversity Conservation in Terrestrial and Marine Ecosystems of the North: Proceedings of the Scientific Session*. Apatity, Kola SC RAS Publ., 2001, pp. 54–56. (In Russ.).
11. Казаков Л.А. Интродукция хвойных в Субарктику. СПб.: Наука, 1993. 145 с.
Kazakov L.A. *Introduction of Conifers into the Subarctic*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 1993. 145 p. (In Russ.).
12. Карбасников А.А. Лесоводственно-биологические особенности роста и развития лиственницы в условиях Вологодской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Вологда–Молочное, 2018. 23 с.
Karbasnikov A.A. *Forest-Biological Characteristics of Growth and Development of Larch in Conditions of the Vologda Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Vologda, 2018. 23 p. (In Russ.).

13. Кищенко И.Т. Лиственница сибирская на западной границе ареала // Принципы экологии. 2015. Т. 4, № 2(14). С. 56–65. Режим доступа: <https://ecopri.ru/> (дата обращения: 01.06.21).

Kishchenko I.T. Siberian Larch at the Western Edge of Its Area. *Principy ekologii* = Principles of the Ecology, 2015, vol. 4, no. 2(14), pp. 55–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j1.art.2015.4142>

14. Кравченко А.В. Сосудистые растения заповедника «Пасвик» и смежной территории Мурманской области. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 281 с.

Kravchenko A.V. *Vascular Plants of the Pasvik Nature Reserve and the Adjacent Territory of the Murmansk Region*. Petrozavodsk, KarRS RAS Publ., 2020. 281 p. (In Russ.).

15. Красоткин И.С. Роща Эйхфельда – уже не памятник природы? // Тиетта. 2016. № 4(38). С. 43–46.

Krasotkin I.S. The Eichfeld Grove – not a Natural Monument Anymore? *Tietta*, 2016, no. 4(38), pp. 43–46. (In Russ.).

16. Крестьянин Л.И. Рост кедр сибирского на Кольском полуострове // Вопр. лесоустройства, таксации и экономики лесного хозяйства. Л.: ЛенНИИЛХ, 1973. С. 178–188.

Krestjashin L.I. Growth of Siberian Cedar on the Kola Peninsula. *Questions of Forest Management, Taxation and Forestry Economics*. Leningrad, LenNIILH Publ., 1973. pp. 178–188. (In Russ.).

17. Крючков В.В., Кондратович И.И., Андреев Г.Н. Красная книга экосистем Кольского Севера / отв. ред. В.В. Никонов. 2-е изд. расш. и доп. Апатиты: Кольск. фил. АН СССР, 1988. 101 с.

Kryuchkov V.V., Kondratovich I.I., Andreyev G.N. *The Red Book of Ecosystems of the Kola North*. Ed by V.V. Nikonov. Apatity, 1988. 101 p. (In Russ.).

18. Недригайлов С.Н. Кедр на Кольском полуострове // Природа. 1949. № 2. С. 131–132.

Nedrigajlov S.N. Cedar on the Kola Peninsula. *Priroda*, 1949, no. 2, pp. 131–132. (In Russ.).

19. Некрасова Т.П. Новое местонахождение кедр на Кольском полуострове // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва. 1949. Т. 81, вып. 5. С. 548.

Nekrasova T.P. A New Location of Cedar on the Kola Peninsula. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* = Proceedings of the All-Union Geographical Society, 1949, vol. 81, iss. 5, pp. 548. (In Russ.).

20. Нестерчук Г.И. Сибирский кедр на Кольском полуострове // Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1931. Т. 27, вып. 3. С. 657–672.

Nesterchuk G.I. Siberian Cedar on the Kola Peninsula. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, 1931, vol. 27, iss. 3, pp. 657–672. (In Russ.).

21. Парфентьева Н.С. О кедрах, произрастающих на островах Кандалакшского залива Белого моря // Вестн. МГУ. Сер.: Биол., почвовед., геол. и геогр. 1959. № 3. С. 67–69.

Parfentyeva N.S. On Cedars Growing on the Islands of the Kandalaksha Bay of the White Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya: Biol., pochvoved., geol. i geogr.* = MSU Vestnik. Series: Biology, Pedology, Geology and Geography, 1959, no. 3, pp. 67–69. (In Russ.).

22. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 216 с.

Ramenskaya M.L. *Analysis of the Flora of the Murmansk Region and Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 216 p. (In Russ.).

23. Тихомиров И.К. Сибирский кедр на Кольском полуострове // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва. 1942. Т. 81, вып. 2. С. 560.

Tikhomirov I.K. Siberian Cedar on the Kola Peninsula. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* = Proceedings of the All-Union Geographical Society, 1942, vol. 81, iss. 2, pp. 560. (In Russ.).

24. Хамитов Р.С. Интродукция сосны кедровой сибирской на генетико-селекционной основе в таежную зону Восточно-Европейской равнины: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Вологда, 2015. 41 с.

Khamitov R.S. *Introduction of Siberian Pine on Genetic and Selective Basis in the Taiga Zone of the East European Plain*: Doct. Agric. Sci. Diss. Abs. Vologda, 2015. 41 p. (In Russ.).

25. Цветков В.Ф., Сизов И.И. Использование интродуцируемых древесных пород при лесовосстановлении на Кольском полуострове // Вопросы интродукции хозяйственно-ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск: АИЛиЛХ, 1989. С. 131–143.

Tsvetkov V.F., Sizov I.I. Use of Introduced Tree Species in Reforestation on the Kola Peninsula. *Issues of Introduction of Economically Valuable Tree Species to the European North*. Arkhangelsk, AFFCI Publ., 1989, pp. 131–143. (In Russ.).

26. Цветков В.Ф., Черкизов Е.А. Использование интродуцентов при рекультивации земель, нарушенных воздействием промвыбросов на Кольском полуострове // Вопросы интродукции хозяйственно-ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск: АИЛиЛХ, 1989. С. 144–148.

Tsvetkov V.F., Cherkizov E.A. The Use of Introducents in the Reclamation of Land Affected by Industrial Pollution on the Kola Peninsula. *Issues of Introduction of Economically Valuable Tree Species to the European North*. Arkhangelsk, AFFCI Publ., 1989, pp. 144–148. (In Russ.).

27. Цинзерлинг Ю.Д. О северо-западной границе сибирской лиственницы (*Larix sibirica* Ledb.) // Тр. БИН АН СССР. Сер. 3: Геоботаника. 1933. Вып. 1. С. 87–97.

Tsinzerling Yu.D. On the North-Western Boundary of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledb.). *Proceedings of the Botanical Institute of the Academy of Sciences USSR. Series 3: Geobotany*. Saint Petersburg, 1933, iss. 1, pp. 87–97. (In Russ.).

28. Черкизов Е.А. Кедр сибирский на Кольском полуострове // Природа Заполярья и ее охрана. Вып. 1. Мурманск: Кн. изд-во, 1973. 55 с.

Cherkizov E.A. Siberian Cedar on the Kola Peninsula. *Priroda Zapolyar'ya i ee ohrana*. Vol. 1. Murmansk, Izdatel'stvo «Kniga» Publ., 1973. 55 p. (In Russ.).

29. Яковлев В.А. Климат Мурманской области. Мурманск: Кн. изд-во, 1961. 180 с.

Yakovlev V.A. The Climate of the Murmansk Region. Murmansk, Izdatel'stvo «Kniga» Publ., 1961. 180 p. (In Russ.).

30. Farjon A.A. *Handbook of the World's Conifers*. Leiden, Boston, Brill Publ., 2010, vol. 2. 1111 p. <https://doi.org/10.1163/9789047430629>

31. Fedorkov A. Vitality and Height Growth of Two Larix Species and Provenances in a Field Trial Located in North-West Russia. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 1, art. no. 1053. <https://doi.org/10.14214/sf.1053>

32. Hakkila P., Winter A. On the Properties of Larch Wood in Finland. *Communications Instituti Forestalis Fenniae*, 1973, vol. 79, no. 7, pp. 1–45.

33. Korhonen M. *Fuscoboletinus spectabilis*, *Euroopalleuusi tatti*, *Loytyi suomesta*. *Sienilehti*. 1991, vol. 43, no. 1, pp. 6–8.

34. Kozhin M.N., Sennikov A.N. The Russian Larch (*Larix archangelica*, Pinaceae) in the Kola Peninsula. *Memoranda Soc. Fauna Flora Fennica*, 2016, vol. 92, pp. 79–91.

35. Krüssmann G. *Die Nadelgehölze*. Berlin, Hamburg, Verlag Paul Parey Publ., 1979, 264 p. (In German).

36. Kullman L. Palaeoecological, Biogeographical and Palaeoclimatological Implications of Early Holocene Immigration of *Larix sibirica* Ledeb. into the Scandes Mountains, Sweden. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1988, vol. 7, no. 3, pp. 181–188. <https://doi.org/10.2307/2997373>

37. Kuosmanen N., Fang R., Bradshaw R. Role of Forest Fires in Holocene Stand-Scale Dynamics in the Unmanaged Taiga Forest of Northwestern Russia. *The Holocene*, 2014, vol. 24, no. 11, pp. 1503–1514. <https://doi.org/10.1177/0959683614544065>
38. Kuosmanen N., Seppä H., Reitalu T., Alenius T., Bradshaw R.H.W., Clear J.L., Filimonova L., Kuznetsov O., Zaretskaya N. Long-Term Forest Composition and Its Drivers in Taiga Forest in NW Russia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00334-015-0542-y>
39. Lukkarinen A.J. Growth Rhythm, Height Growth and Survival of Russian Larch (*Larix Mill.*) Provenances in Greenhouse and Field Conditions in Finland. *Dissertationes Forestales*, 2013, no. 160, pp. 1–43. <https://doi.org/10.14214/df.160>
40. Lukkarinen A.J., Ruotsalainen S., Nikkanen T., Peltola H. The Growth Rhythm and Height Growth of Seedlings of Siberian (*Larix sibirica* Ledeb.) and Dahurian (*Larix gmelinii* Rupr.) Larch Provenances in Greenhouse Conditions. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 5–20. <https://doi.org/10.14214/sf.215>
41. Martinsson O., Lesinski O. *Siberian Larch – Forestry and Timber in a Scandinavian Perspective*. Jamtlands, IiLU Publ., 2007. 90 p.
42. Ruotsalainen S. *The History of Cultivation of Exotic Tree Species in Finland. Natural Resources and Bioeconomy Studies*. Finland, Helsinki, Natural Resources Institute Publ., 2017, vol. 88. 27 p.
43. Venäläinen M., Harju A.M., Nikkanen T., Paajanen L., Velling P., Viitanen H. Genetic Variation in the Decay Resistance of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) Wood. *Holzforschung*, 2001, vol. 55, no. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1515/HF.2001.001>
44. Vidaković M. *Conifers. Morphology and Variation*. Croatia, Grafike Zavod Hrvatske Publ., 1991. 755 p.
45. Wagner S., Litt T., Goni M., Petit R. History of *Larix decidua* Mill. (European Larch) Since 130 ka. *Quaternary Science Reviews*, 2015, vol. 124, pp. 224–247. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.002>

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

Научная статья

УДК 581.5:582.475.4:631.524

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-58-75

Изменчивость биохимических признаков *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при адаптации форм в условиях избыточного увлажнения

С.Н. Тарханов[✉], д-р биол. наук, зав. лаб., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

Е.А. Пинаевская, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-6293-2020](https://orcid.org/0000-0003-1877-1412),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-1412>

Ю.Е. Аганина, аспирант, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-6305-2020](https://orcid.org/0000-0002-6069-8979),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

А.С. Пахов, мл. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-8840>

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; tarkse@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru, aleksander.pakhoff@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.21 / Одобрена после рецензирования 27.07.21 / Принята к печати 02.08.21

Аннотация. Хвойные характеризуются определенной индивидуальной изменчивостью содержания стрессовых метаболитов, которая может являться результатом генотипических различий или расхождений в условиях произрастания отдельных деревьев. Цель исследования – оценка изменчивости биохимических признаков у форм сосны обыкновенной, различающихся цветом мужских стробиллов, при адаптации этих форм в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги. Изучение динамики метаболических показателей у форм сосны обыкновенной проведено в кустарничково-сфагновых сосняках на болотных верховых почвах в районе устья р. Северной Двины (северная подзона тайги). У 10 деревьев сосны каждой из выделенных по цвету мужских стробиллов форм отобраны образцы хвои на побегах, формирующихся в текущем году – в июле–ноябре 2018 г. В лабораторных условиях определено содержание фотосинтетических пигментов, антоцианов, аскорбиновой кислоты, пролина, водорастворимых белков, а также уровень рН. Установлено, что в засушливый летний период синтез хлорофиллов в хвое текущего года формирования снижается у деревьев обеих форм. Благоприятный температурный режим осенью способствует увеличению длительности накопления фотосинтетических пигментов, что в целом может отрицательно сказаться на подготовке деревьев к перезимовке. Значительных различий краснопыльничковой и желтопыльничковой форм по содержанию хлорофиллов и каротиноидов, антоцианов, аскорбиновой кислоты, свободного пролина, водорастворимых белков и рН формирующейся молодой хвои не обнаружено. Выявлено сходство в адаптации этих форм к постоянному избыточному увлажнению почв в условиях северной тайги. Обнаружено существенное влияние сезонного фактора на динамику биохимических показателей у деревьев исследуемых форм. Высокая температура воздуха в летний период приводит к более активному накоплению аскорбиновой кислоты, пролина и антоцианов в хвое, а следовательно, к повышению ее антиоксидантной активности и развитию защитных механизмов, направленных на предотвращение окислительного стресса в этих

условиях. Повышение содержания водорастворимых белков в хвое в октябре–ноябре способствует усилению криозащитных функций при подготовке деревьев к перезимовке. Уровни индивидуальной изменчивости содержания аскорбиновой кислоты и пролина в хвое сосны с желтым цветом микростробилов при установлении отрицательных температур в ноябре существенно выше, чем у сосны с красными микростробилами. Это связано с нормой реакции деревьев разных форм на влияние отрицательных температур.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, краснопыльничковая форма, желтопыльничковая форма, хвоя текущего года, фотосинтетические пигменты, антоцианы, pH, аскорбиновая кислота, пролин, водорастворимые белки, длительное избыточное увлажнение почв

Благодарности: Исследования выполнены в рамках госзадания ФИЦ комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН (проект № FUUW-2022-0057, № ГР 122011400384-2).

Для цитирования: Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Изменчивость биохимических признаков *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при адаптации форм в условиях избыточного увлажнения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 58–75. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-58-75>

Original article

Variability of Biochemical Properties During Adaptation of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Forms to Excessive Moisture Conditions

Sergei N. Tarkhanov[✉], Doctor of Biology, Laboratory Chief, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

Ekaterina A. Pinaevskaya, Candidate of Biological Sciences, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [ABB-6293-2020](https://orcid.org/0000-0003-1877-1412), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-1412>

Yuliya E. Aganina, Postgraduate Student, Junior Research Scientist;

ResearcherID: [ABB-6305-2020](https://orcid.org/0000-0002-6069-8979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

Alexander S. Pakhov, Junior Research Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-8840>

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Nikoskiy, 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; tarkse@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru, aleksander.pakhoff@yandex.ru

Received on April 07, 2021 / Approved after reviewing on July 27, 2021 / Accepted on August 02, 2021

Abstract. Conifers are characterized by a certain degree of individual variability in the content of stress metabolites, which can be caused by genotypic variations or divergence in the growth conditions of individual trees. The purpose of the study is to evaluate the variation of biochemical traits of Scots pine, which are different in the color of male strobilus, during adaptation to the conditions of constant excessive moisture in the soil of the northern taiga. The dynamics of metabolic parameters of *Pinus sylvestris* L. were investigated in shrub-sphagnum pine stands on marshy upland soils at the mouth of the Northern Dvina River (northern taiga subzone). From July to November 2018, needle samples from shoots were collected from 10 pine trees of each of the male strobilus types, differentiated by color. The contents of photosynthetic pigments, anthocyanins, ascorbic acid, proline, water-soluble proteins, and pH were measured under laboratory conditions. The synthesis of chlorophyll in

the needles in the current year of formation decreased in trees of both forms during the dry summer period. A favorable temperature in the autumn period could promote an extension of photosynthetic pigment accumulation, which might negatively affect tree preparation for overwintering. There were no significant differences between f. *erythranthera* Sanio and f. *sulfuranthera* Kozubow in the needle content of chlorophyll and carotenoids, anthocyanins, ascorbic acid, free proline, water-soluble proteins, or pH. The similarities in the adaptation of the trees to the constant excessive soil moisture in northern taiga conditions were revealed. The seasonal factor had a considerable impact on the dynamics of biochemical parameters. Ascorbic acid, proline, and anthocyanin were more actively accumulated in the needles throughout the summer due to the high air temperature, resulting in an increase in antioxidant activity and the development of protective mechanisms aimed at reducing oxidative stress. The increase in water-soluble protein content in needles from October to November is one of the cryoprotective mechanisms of the trees for the winter period. Individual differences in ascorbic acid and proline contents in yellow microspore-bearing pine needles at the establishment of minus temperatures in November were considerably higher than in red microspore-bearing pine needles. This is regarded as the norm of the reaction for different types of trees to the influence of negative temperatures.

Keywords: *Pinus sylvestris*, f. *erythranthera* Sanio, f. *sulfuranthera* Kozubow, needles of the current year, photosynthetic pigment, anthocyanin, pH, ascorbic acid, proline, water-soluble, prolonged excessive soil moisture

Acknowledgements: The study was performed as part of the state assignment of the N. Lavrov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. FUUW-2022-0057, No. GR. 122011400384-2).

For citation: Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Y.E., Pakhov A.S. Variability of Biochemical Properties During Adaptation of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Forms to Excessive Moisture Conditions. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 58–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-58-75>

Введение

Растения используют ряд стратегий для адаптации метаболизма к изменению условий внешней среды, при этом диапазон варьирования метаболических признаков зависит от экстремальности воздействия внешних факторов [15]. При гипоксии корневой системы у деревьев наблюдается активация механизмов адаптации: синтез свободных аминокислот, белков, низкомолекулярных углеводов, окислительных ферментов и других протекторных соединений [28, 29, 37]. Хвойные характеризуются определенной индивидуальной изменчивостью содержания стрессовых метаболитов, которая может являться результатом генотипических различий или расхождений в условиях произрастания отдельных деревьев [31, 52]. Реакции деревьев разных форм можно расценивать как адаптивные, позволяющие обеспечивать их устойчивость к воздействию стрессовых факторов. Признаки генеративных органов являются наиболее надежными морфологическими маркерами наследственных форм у древесных. Признаки генеративных органов обладают низкими уровнями экологической и географической изменчивости, стабильны во всех метамерах кроны деревьев и во времени [1, 15, 23, 24, 26]. Считается [7], что в этом случае в процессе онтогенеза признак не зависит от формирующих его условий, а его развитие определяется преимущественно генотипом особи. У сосны обыкновенной различия в

окраске микростробилов являлись основанием для выделения краснопыльничковой (f. *erythranthera* Sanio) и желтопыльничковой (f. *sulfuranthera* Kozubow) форм.

Изменения в пигментном фонде отражают структурно-функциональную реорганизацию фотосинтетического аппарата и являются неотъемлемой составляющей комплексного процесса закаливания растений [27]. Для хвойных видов показаны сезонная реорганизация тилакоидной системы хлоропластов пигмент-белковых комплексов, количественные и качественные изменения пигментного фонда [18]. В ряде работ сообщается об уменьшении фонда зеленых пигментов в результате окислительной деградации части хлорофилла в листьях в неблагоприятный период года [16, 20, 32, 45]. Такое явление имеет адаптивное значение для выживания растений, зимующих с зелеными листьями, потому что это позволяет снизить количество поглощенной и не используемой на фотосинтез энергии [45]. В условиях высокой инсоляции часто наблюдается повышение доли каротиноидов, выполняющих в этом случае функцию защиты от фотоингибирования [40]. Адаптация пигментного аппарата происходит путем трансформации светособирающего пигментного комплекса [41]. По данным [9], на долю антенных (светособирающих) хлорофиллов растений таежной зоны европейского северо-востока России приходится 55–65 % фонда зеленых пигментов. Поскольку хлорофилл *b* находится в пигмент-белковых светособирающих комплексах фотосистемы II, изменение соотношения хлорофиллов *a/b* может быть связано с изменением ее функционирования [36]. Известно [14], что насыщение почвы водой вокруг корней растений наиболее сильно воздействует на светособирающий хлорофилл *a/b* – белковый комплекс.

Все виды стресса у растений сопровождаются усилением окислительных процессов и активизацией систем антиоксидантной защиты [33]. Одни исследователи в качестве более эффективной защиты метаболизма от активных форм кислорода выделяют ферментативную систему [53], другие – низкомолекулярные антиоксиданты [38]. Антоцианы непосредственно участвуют в детоксикации свободных радикалов [39, 50], смягчают действие ультрафиолета, обладают антиоксидантной активностью в условиях различных стрессовых воздействий [50]. Холодостойкие виды имеют ту же систему антиоксидантной защиты, что и теплолюбивые [44]. Доминирующее положение во внутри- и внеклеточной защите занимает аскорбиновая кислота, являясь потенциальным донором атомов водорода и электронов, используемых для восстановления перекиси водорода или некоторых свободнорадикальных продуктов [22].

Накоплены экспериментальные данные, демонстрирующие осмопротекторные свойства пролина, его способность стабилизировать структуру белков и регулировать рН цитоплазмы, снижать содержание активных форм кислорода [51]. Пролин может выступать в качестве сигнальной молекулы, быть модулятором пролиферации и гибели клеток [51]. В клетках растений, находящихся в стрессовых условиях, пролин составляет около 5 % от всего пула свободных аминокислот [43]. Пролин накапливается в органах многих видов растений в ответ на экологический стресс [46]. Осенью на фоне общего снижения активности метаболических процессов в меристематических клетках у хвойных наблюдается инициация целого ряда адаптивных механизмов, включающих изменение физико-химических свойств цитозоля посредством синтеза водорастворимых соединений, в том числе белков [3]. По увеличению уровня водорастворимых белков можно судить об активации защитных реакций сосны [12].

Цель работы – оценка изменчивости биохимических признаков у форм сосны обыкновенной, различающихся цветом мужских стробиллов, при их адаптации в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в северотаежных разновозрастных кустарничково-сфагновых сосняках в районе устья р. Северной Двины (Архангельское лесничество, Ижемское участковое лесничество, квартал 121, 64°45' с. ш. 41°02' в. д.), где почвы представлены торфом, как правило, сфагновым или пушице-сфагновым, низкой степени разложения. Торф имеет сильную реакцию среды (рН солевой суспензии – 2,6–3,2), высокую обменную и гидролитическую кислотность, очень низкую степень насыщенности основаниями (11–14 %). Содержание золы в верхнем слое торфа составляет 2–4 %. В сосняках такого типа большую часть теплого периода уровень почвенно-грунтовых вод находится в непосредственной близости от поверхности и только эпизодически, после длительных сухих периодов, снижается до 25–30 см. Средняя продолжительность подтопления верхнего 10-сантиметрового слоя почвы составляет 64 дня [11]. Торф верхних горизонтов характеризуется низкой объемной массой, высокой полевой влажностью, близкой к полной влагоемкости (90–94 %). Лесоводственно-геоботаническое описание, таксационную характеристику древостоев давали общепринятыми методами [4, 19, 21, 30]. Состав древостоя – 10С, средний возраст – 100 лет, средняя высота – 10 м, средний диаметр ствола – 11 см, сомкнутость крон – 0,4, класс бонитета – Va. Травяно-кустарничковый ярус характеризуется преобладанием багульника, клюквы, кассандры, подбела, голубики. Из трав иногда встречаются пушица и морошка. Моховой покров сплошной, состоящий из сфагновых мхов. Из подлесочных видов обычна карликовая береза.

Для определения биохимических признаков у 10 деревьев сосны каждой из выделенных по цвету мужских стробиллов форм отбирали образцы хвои на побегах, формирующихся в текущем году. Для изучения сезонной динамики этих признаков отбор образцов хвои производили на одних и тех же деревьях в период ее формирования, в конце вегетации и подготовки вновь образованных побегов к перезимовке – в июле–ноябре 2018 г. В лабораторных условиях спектрофотометрическим методом при помощи спектрофотометра Nano Drop 2000С определяли содержание в хвое фотосинтетических пигментов [25] и антоцианов [17], аскорбиновой кислоты [8], свободного пролина [35], водорастворимых белков по методу Kalb, Bernlohr [5]. Долю хлорофиллов в светособирающем комплексе рассчитывали по формуле [42]. С помощью рН-метра Delta 320 рН (Mettler Toledo) измеряли рН гомогената хвои [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Максимальное содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также суммарное содержание в хвое текущего года хлорофиллов и каротиноидов у сосны обыкновенной с разным цветом микростробиллов наблюдается в первой декаде октября (рис. 1). Достоверные различия концентрации хлорофилла *a*, суммы хлорофиллов, общего содержания пигментов выявлены между показателями октября и июля ($t = 2,85-8,19$; $t_{0,05} = 2,45-2,57$). Содержание пигментов в хвое обеих форм сосны больше в октябре. Концентрация каротиноидов в хвое разных форм существенно различается между показателями июля, августа и сен-

тября с одной стороны и показателями октября и ноября с другой ($t = 2,73-8,65$; $t_{0,05} = 2,26-2,57$). Содержание каротиноидов в октябре–ноябре значительно больше по сравнению с содержанием в июле–сентябре. У формы с красными микростробилами в ноябре по сравнению с октябрём существенно уменьшаются содержание хлорофиллов и общая сумма пигментов ($t = 5,92-7,34$; $t_{0,05} = 2,31$). В августе и сентябре у формы с красными микростробилами количество фотосинтетических пигментов значительно меньше, чем в октябре ($t = 4,12-8,65$; $t_{0,05} = 2,26$). У формы с желтыми микростробилами в августе отмечено существенное снижение только концентрации каротиноидов, а в сентябре – хлорофилла b , каротиноидов и общей суммы пигментов ($t = 2,50-3,85$; $t_{0,05} = 2,26$). Наибольшее содержание хлорофилла a по отношению к хлорофиллу b в хвое текущего года у обеих форм сосны наблюдается в августе, а осенью этот показатель снижается (рис. 1). У формы с желтым цветом микростробилов соотношение хлорофилла a и b существенно меньше в июле по сравнению с показателями августа и сентября ($t = 2,58-3,50$; $t_{0,05} = 2,26-2,57$), а в октябре – по сравнению со значением для августа ($t = 2,63$; $t_{0,05} = 2,26$). У формы с красными микростробилами отношение содержания хлорофилла a к хлорофиллу b в октябре и ноябре значительно ниже по сравнению с отношением для августа ($t = 3,59-4,80$; $t_{0,05} = 2,26$).

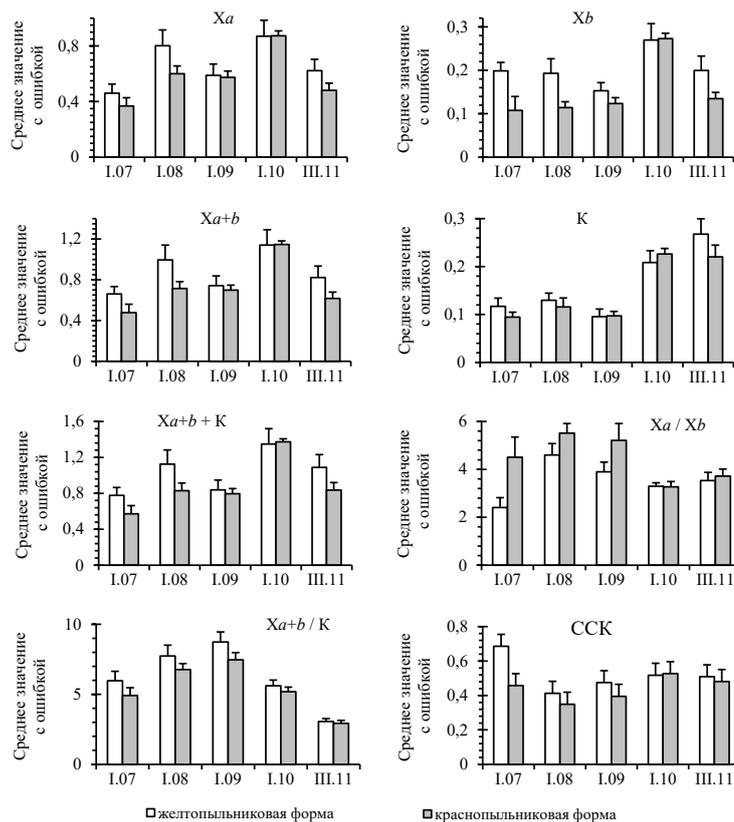


Рис. 1. Сезонная динамика содержания, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ воздушно сухой массы, хлорофилла a и b (Xa и Xb), каротиноидов (K) и доли хлорофиллов светособирающего комплекса (ССК) в хвое текущего года (I.07–III.11 – декада. месяц)

Fig. 1. Seasonal dynamics of the content of photosynthetic pigments in the needles of the current year ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ air dry weight). Xa – chlorophyll a ; Xb – chlorophyll b ; K – carotenoids; ССК – the fraction of chlorophylls in the light-absorbing complex (I.07 – III.11 – decade. month)

Отношение хлорофиллов к каротиноидам у обеих форм в августе и сентябре существенно больше по сравнению с другими месяцами, минимальное значение этого показателя наблюдается в ноябре (t -критерий; $p < 0,05$). У формы с желтым цветом микростробиллов довольно четко выражен июльский максимум доли хлорофиллов в светособирающем комплексе. У формы с красными микростробилами этого не наблюдается. Минимальная величина данного показателя отмечается у деревьев обеих форм в августе. Достоверные различия абсолютных и относительных показателей содержания хлорофиллов и каротиноидов, доли хлорофиллов светособирающего комплекса в хлоропластах хвои разных форм не наблюдаются ($t < t_{0,05}$). Зависимость содержания хлорофиллов a и b и каротиноидов, их соотношений, доли хлорофиллов светособирающего комплекса в хлоропластах хвои от сезона у формы с красными микростробилами подтверждается результатами однофакторного дисперсионного анализа ($F = 3,44-18,25$; $F_{0,05} = 2,61$). У формы с желтыми микростробилами зависимость от сезона доказана для концентрации каротиноидов, относительных количеств хлорофиллов и каротиноидов, доли хлорофиллов светособирающего комплекса в хлоропластах хвои ($F = 3,95-14,45$; $F_{0,05} = 2,60$).

Наблюдаются существенные различия дисперсий показателей фотосинтетического пигментного комплекса хвои между отдельными календарными периодами, а также разными формами (F -критерий; $p < 0,05$). Индивидуальная изменчивость содержания фотосинтетических пигментов в различные периоды и у разных форм имеет разные уровни ($CV = 8-78\%$) (рис. 2).

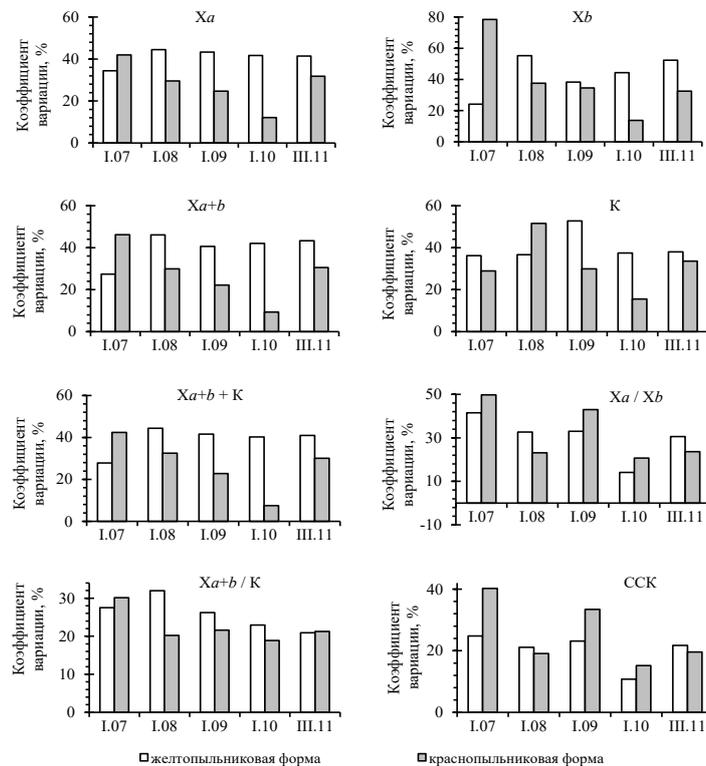


Рис. 2. Индивидуальная изменчивость фотосинтетических пигментов в хвое текущего года (условные обозначения те же, что на рис. 1)

Fig. 2. Individual variation of photosynthetic pigments in the needles of the current year (the notations are the same as in fig. 1)

У формы с желтыми микростробилами концентрация антоцианов в хвое текущего года летом значительно больше по сравнению с осенью ($t = 2,43-4,10$; $t_{0,05} = 2,26$). У сосны с красными микростробилами содержание антоцианов в хвое в августе существенно больше, чем в октябре и ноябре ($t = 2,43-2,54$; $t_{0,05} = 2,26$) (рис. 3). Достоверные различия содержания антоцианов между этими формами не установлены ($t < t_{0,05}$). Методом однофакторного дисперсионного анализа доказано влияние сезона на содержание антоцианов в хвое обеих форм ($F = 3,25-9,00$; $F_{0,05} = 2,58-2,59$). Индивидуальная вариабельность содержания антоцианов между деревьями с желтыми микростробилами в июле и августе значительно выше ($CV = 41-48\%$) по сравнению с осенними месяцами ($CV = 20-25\%$) – F-критерий; $p < 0,05$. У деревьев с красными микростробилами этот показатель в августе существенно выше ($CV = 45\%$), чем в ноябре ($CV = 23\%$) – $t = 2,43-2,54$; $t_{0,05} = 2,26$ (рис. 4).

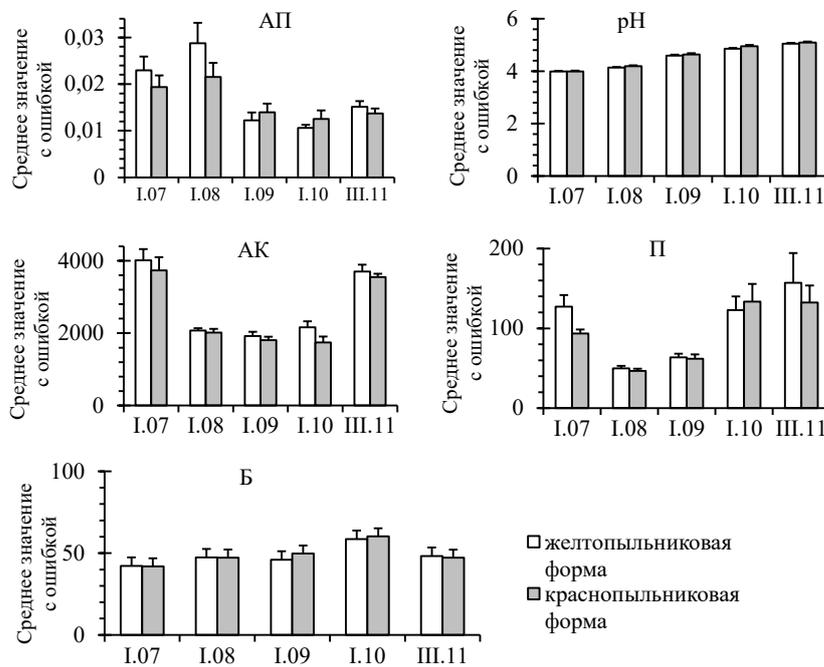


Рис. 3. Сезонная динамика содержания антоцианов (АП), %, аскорбиновой кислоты (АК) и пролина (П), $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ воздушно сухой массы, и водорастворимых белков (Б), $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ воздушно сухой массы, а также уровень рН для хвои текущего года

Fig. 3. Seasonal dynamics of anthocyanins (АП), %, ascorbic acid (АК), proline (П), $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ air-dry weight, water-soluble proteins (Б), $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ air-dry weight and pH level for the needles of the current year

Установлено постепенное повышение с июля до конца ноября рН гомогената хвои текущего года у деревьев с разным цветом микростробилов (рис. 3). Различия этого показателя между разными месяцами достоверны (t-критерий; $p < 0,05$). Между формами достоверные различия рН хвои не выявлены ($t < t_{0,05}$). При этом коэффициент вариации показателя рН между отдельными деревьями сосны с красными микростробилами не превышает 3,7 %. У формы с желтым цветом микростробилов – не превышает 2,3 %. Однако достоверные различия между формами не выявлены ($F < F_{0,05}$). Результаты однофакторного дисперсионного анализа свидетельствуют о влиянии сезона на рН гомогената хвои ($F = 120,53-239,07$; $F_{0,05} = 2,58$).

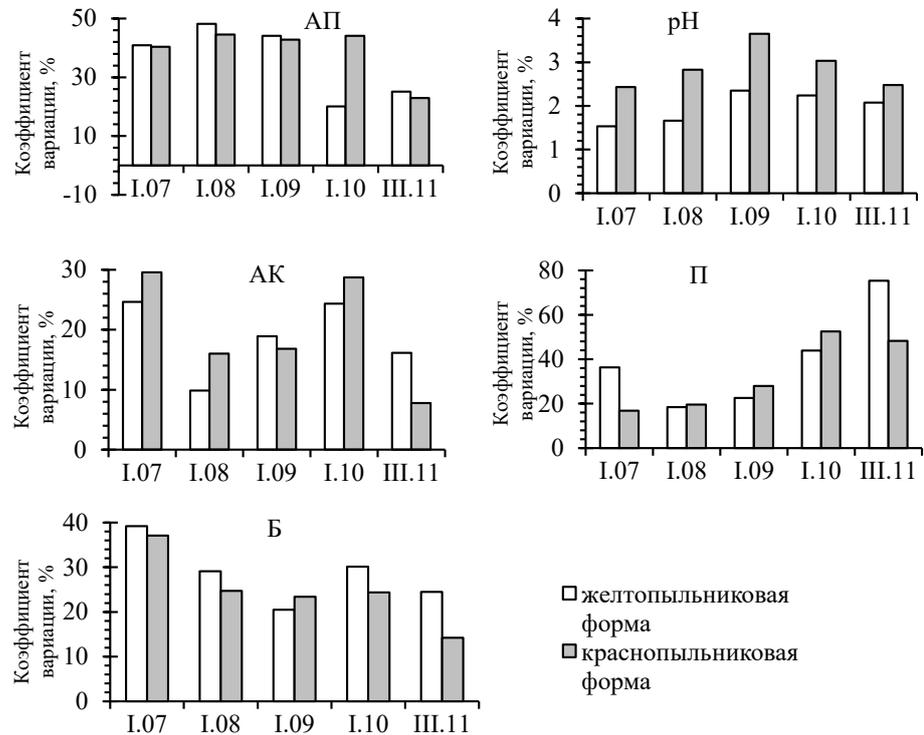


Рис. 4. Индивидуальная изменчивость биохимических параметров хвои текущего года (условные обозначения те же, что на рис. 3)

Fig. 4. Individual variation of biochemical parameters of the needles of the current year (the notations are the same as in fig. 3)

Содержание аскорбиновой кислоты у деревьев обеих форм в июле значительно больше, чем в августе, сентябре и октябре ($t = 4,49-6,27$; $t_{0,05} = 2,26-2,31$) (рис. 3). В ноябре наблюдается существенное увеличение этого показателя у обеих форм по сравнению с августом, сентябрем и октябрем ($t = 6,12-13,13$; $t_{0,05} = 2,26-2,31$). Между деревьями краснопыльничковой и желтопыльничковой форм достоверные различия концентрации аскорбиновой кислоты не наблюдаются ($t < t_{0,05}$). Результаты однофакторного дисперсионного анализа подтверждают зависимость содержания аскорбиновой кислоты в хвое текущего года от сезона у обеих форм ($F = 26,78-27,92$; $F_{0,05} = 2,58-2,59$). Влияние фактора формы на изменчивость этого показателя не является доказанным при критических значениях F-критерия ($p > 0,05$). Установлен более высокий уровень индивидуальной изменчивости концентрации аскорбиновой кислоты в ноябре у желтопыльничковой формы ($CV = 16\%$) по сравнению с краснопыльничковой ($CV = 8\%$) – $F = 4,70$; $F_{0,05} = 3,20$.

Наименьшее содержание пролина в хвое текущего года у разных форм сосны обыкновенной отмечается в августе (рис. 3). Наблюдается его повышенная концентрация у деревьев с разным цветом микростробилов в июле ($t = 4,14-8,17$; $t_{0,05} = 2,26$) и в октябре–ноябре ($t = 2,48-3,99$; $t_{0,05} = 2,26$) по сравнению с августом–сентябрем. Существенные различия содержания пролина между формами с желтыми и красными микростробилами не выявлены ($t < t_{0,05}$). Методом однофакторного дисперсионного анализа доказано влия-

ние сезона на концентрацию пролина в хвое деревьев обеих форм ($F = 5,03-8,19$; $F_{0,05} = 2,58$). Отмечено существенное снижение коэффициента вариации концентрации пролина между деревьями обеих форм в августе–сентябре ($CV = 19-28\%$) по сравнению с октябрём–ноябрём ($CV = 44-75\%$) – F -критерий; $p < 0,05$ (рис. 4). У формы с красными микростробилами в июле индивидуальная вариабельность этого показателя существенно ниже ($CV = 17\%$) по сравнению с формой с желтым цветом микростробилов ($CV = 36\%$) – $F = 8,60$; $F_{0,05} = 3,20$. В ноябре коэффициент вариации содержания пролина также значительно ниже у формы с красными микростробилами ($CV = 48\%$) по сравнению с формой с желтыми микростробилами ($CV = 75\%$) – $F = 3,41$; $F_{0,05} = 3,20$.

Выявлено существенное повышение содержания водорастворимых белков в хвое текущего года у формы с красными микростробилами в ноябре по сравнению с июлем, августом и сентябрем ($t = 2,60-2,72$; $t_{0,05} = 2,26-2,31$) (рис. 3). Достоверные различия этого показателя между формами с разным цветом микростробилов не установлены ($t > t_{0,05}$). Зависимость концентрации водорастворимых белков в хвое деревьев этих форм от сезона подтверждается результатами однофакторного дисперсионного анализа ($F = 2,87-4,20$; $F_{0,05} = 2,58$). Индивидуальная изменчивость содержания водорастворимых белков у обеих форм осенью снижается ($CV = 14-30\%$) по сравнению с июлем ($CV = 37-39\%$) (рис. 4). Различия коэффициента вариации этого показателя между июлем, августом, сентябрем с одной стороны ($CV = 23-37\%$) и ноябрём с другой ($CV = 14\%$) достоверны ($F = 3,84-8,85$; $F_{0,05} = 3,20-3,40$) у формы с красными микростробилами. У формы с желтыми микростробилами различия этого показателя достоверны только между июлем ($CV = 39\%$) и ноябрём ($CV = 25\%$) – $F = 4,80$; $F_{0,05} = 3,20$.

Основным фактором, определяющим динамику уровня почвенно-грунтовых вод, является количество выпадающих осадков. Большую часть вегетационного периода уровень почвенно-грунтовых вод находится в непосредственной близости от поверхности почвы. При этом содержание кислорода в почвенной воде не превышает 2 мг/л, что значительно меньше его уровня, необходимого для нормального функционирования корневой системы. Среднемесячная температура воздуха в районе исследований в июле 2018 г. была выше (19,4 °С) среднемноголетней для этого месяца (15,6 °С), а количество осадков более чем в 2 раза меньше (31 мм) по сравнению со среднемноголетними показателями (64 мм). Температура воздуха в августе (15,3 °С) оказалась несколько выше нормы, а сумма осадков в этот месяц (118 мм) выше нормы (67 мм) почти в 2 раза. Сентябрь был теплее (10,7 °С) обычного (7,9 °С), осадков (56 мм) выпало около нормы (69 мм). По мнению В.Н. Коновалова, Л.В. Зарубиной [13], такое количество осадков обуславливает на торфяных почвах подтопление корнеобитаемого слоя и неблагоприятно отражается на процессах метаболизма. По нашим данным, это приводит к снижению суммарного содержания хлорофиллов. В то же время, содержание метаболитов, играющих защитную роль (антоцианов, аскорбиновой кислоты), у обеих форм сосны в июле повышается. Есть сведения [13], что при наступлении жаркой и сухой погоды кислород в почвенной воде полностью исчезает. В свою очередь известно, что атмосферные осадки обогащают воду кислородом. Однако анализ почвенной воды, проведенный на 2-й день после выпадения обильных осадков, показал, что и в этом случае содержание растворенного в ней кислорода не превышает 2–3 мг/л, т. е. составляет около 30 % от нормального насыщения [13].

Уменьшение фонда зеленых пигментов у хвойных вечнозеленых растений является характерным адаптивным признаком [32]. Жаркая и сухая погода в июле оказала отрицательное влияние на накопление зеленых пигментов в хвое 2018 г. формирования, что способствовало уменьшению общей суммы фотосинтетических пигментов у деревьев разных форм. Согласно ранее полученным в ходе исследований на Северном и Приполярном Урале результатам [10], при жаркой и сухой погоде наблюдается депрессия фотоассимиляции у лиственницы сибирской, сопровождающаяся снижением проводимости устьиц хвои. Можно предположить, что это проявляется и в реакции хвои сосны обыкновенной на начальной стадии ее формирования и негативно отражается на синтезе хлорофилла.

Увеличение соотношения хлорофиллов *a* и *b* в августе–сентябре свидетельствует о негативном влиянии внешней среды на долю хлорофиллов светособирающего комплекса в хлоропластах. По нашим данным, доля хлорофиллов, локализованных в светособирающем комплексе, в среднем по месяцам (с июля по ноябрь) составляет 35–55 и 41–69 % соответственно для формы с красным и желтым цветом микростробиллов. Эта амплитуда связана с адаптацией фотосинтетического аппарата разных форм сосны обыкновенной к световым условиям в высоких широтах.

У формы с желтым цветом микростробиллов выражен июльский максимум доли хлорофиллов в светособирающем комплексе, а у формы с красными микростробилами этого не наблюдается. Такая закономерность свидетельствует об особенностях адаптации форм к сезонным климатическим изменениям в условиях постоянного избыточного увлажнения почв в высоких широтах. Ранее также была показана зависимость содержания и соотношения хлорофиллов и каротиноидов от жизненной формы растений в таежной зоне европейского северо-востока России [9].

Среднемесячная температура воздуха в первой декаде октября (3,5 °С), по информации метеостанции «Архангельск», была более чем в 2 раза выше средней многолетней для этого месяца (1,5 °С). Благоприятный температурный режим способствовал накоплению фотосинтетических пигментов в хвое текущего года в этот период у деревьев разных форм. Можно предполагать, что благоприятные метеоусловия в сентябре–октябре не способствовали закаливанию сосны в этот период. Уменьшение содержания хлорофилла в хвое текущего года формирования наблюдалось при значительном понижении температуры воздуха (до –1 °С) в ноябре, в период закаливания.

Значительное увеличение содержания каротиноидов в октябре–ноябре в хвое текущего года формирования у сосны свидетельствует о повышении их защитной роли перед перезимовкой в условиях сезонного климата. Учитывая, что каротиноиды в антенном комплексе выполняют защитную функцию, связанную с тушением возбужденных триплетных состояний хлорофилла и активных форм кислорода [47, 48], а также защищают липидный бислой мембран, снижение их концентрации правильно объяснять их усиленным расходом на поддержание фотохимической роли хлорофилла в условиях стрессового воздействия [34, 49]. Это проявилось на начальных стадиях формирования хвои сосны в июле–сентябре и связано, по-видимому, с ее физиологическим состоянием в стрессовых условиях.

Летнее повышение содержания антоцианов в хвое текущего года можно объяснить увеличением освещенности в этот сезон. В опыте по индукции накопления антоцианов в растениях озимого рапса, увеличение освещенности привело к повышению количества антоцианов в гипокотылях и семядолях рапса [2]. Есть вероятность, что высокая температура воздуха летом 2018 г. также стимулировала накопление антоцианов в хвое сосны, что и способствовало повышению ее антиоксидантной активности. Более значительные индивидуальные различия деревьев сосны с разным цветом микростробилов по содержанию антоцианов в летний сезон по сравнению с осенним, предположительно, связаны с защитными реакциями отдельных деревьев в ответ на ультрафиолетовое воздействие. Некоторые деревья характеризуются более значительным увеличением уровня антоцианов в хвое в связи с освещенностью крон в летний период, и, как следствие, необходимостью повышения устойчивости. Другие деревья являются более толерантными или слабее противодействуют этому фактору. Таким образом, индивидуальная изменчивость содержания антоцианов в популяции сосны обыкновенной в летний период увеличивается, что, скорее всего, объясняется их устойчивостью.

Показатель рН хвои сосны обыкновенной зависит от ее возраста и сезона года: показатель изменчив в период вегетации и относительно постоянен при зимнем покое. В период вегетации данный показатель отражает содержание органических кислот в хвое. Чем ниже их содержание, тем выше рН. По нашим данным, рост рН хвои текущего года с июля по ноябрь четко проявляется у деревьев сосны разных форм в условиях постоянного избыточного увлажнения почвы северной тайги. Это говорит о снижении содержания в хвое органических кислот и повышении содержания сахаров. Можно отметить тенденцию к росту индивидуальной вариативности рН гомогената хвои у краснопыльничковой формы по сравнению с желтопыльничковой.

Значительное увеличение содержания аскорбиновой кислоты в хвое текущего года в июле связано с засушливыми условиями в этот месяц (температура выше нормы, а количество осадков существенно ниже). Перед перезимовкой, в ноябре, повышение содержания аскорбиновой кислоты обусловлено действием отрицательных температур. Все это свидетельствует о развитии защитных механизмов у сосны обыкновенной для предотвращения окислительного стресса. Более ощутимые различия деревьев между собой по содержанию аскорбиновой кислоты перед перезимовкой связаны с широтой нормы их реакции на воздействие отрицательных температур.

Судя по полученным нами данным, жаркая и сухая погода в июле и особенно осеннее понижение температуры в октябре–ноябре вызывают интенсивное накопление пролина в хвое текущего года формирования в ответ на экологический стресс. Снижение индивидуальных различий деревьев разных форм в августе–сентябре по содержанию в хвое пролина, вероятно, связано с их физиологической активностью при благоприятных условиях в этот период вегетации по сравнению с другими месяцами, что способствует нивелированию данного показателя антиоксидантной активности у разных деревьев сосны. Индивидуальная изменчивость содержания пролина в выборках деревьев с красным цветом микростробилов в июле существенно ниже, чем у формы с желтым цветом микростробилов. В ноябре этот показатель значительно меньше у формы с

красными микростробилами по сравнению с формой с желтыми микростробилами. Последнее указывает на генетически обусловленные различия деревьев данных форм в отношении их реакций на экологический стресс.

Согласно нашим данным, увеличение содержания водорастворимых белков в хвое сосны в октябре–ноябре свидетельствует о повышении их криозащитной роли при подготовке деревьев к перезимовке. В октябре–ноябре деревья форм с красным цветом микростробилов меньше различаются между собой по содержанию водорастворимых белков в хвое по сравнению с июлем, августом и сентябрем. Эти деревья реагируют на понижение температуры в осенний период сходным образом, и индивидуальная изменчивость показателя в данный период опускается до очень низкого и низкого уровней ($CV = 5\text{--}10\%$).

Заключение

Выявлено сходство в адаптации форм сосны с разным цветом микростробилов к постоянному избыточному увлажнению на болотных верховых почвах северной тайги. Исследования показали, что жаркая и сухая погода в июле оказывает отрицательное влияние на синтез зеленых пигментов в хвое текущего года формирования у разных форм сосны обыкновенной. Это может быть связано с острым дефицитом кислорода в корнеобитаемой слое почвы для нормальной жизнедеятельности корневой системы и депрессией фотоассимиляции, которая сопровождается снижением проводимости устьиц хвои. Увеличение показателя соотношения хлорофиллов a и b в августе (3,9–5,5) и сентябре (4,6–5,2) свидетельствует о негативном воздействии факторов внешней среды на хлорофиллы светособирающего комплекса хлоропластов хвои сосны в условиях длительного избыточного увлажнения почв. Поскольку считается, что хлорофилл b находится в пигмент-белковых светособирающих комплексах фотосистемы II, то изменение соотношения хлорофиллов a/b может быть связано с изменением ее функционирования. Благоприятный температурный режим в сентябре–октябре (10,7 и 3,5 °С соответственно) приводит к увеличению периода накопления фотосинтетических пигментов у деревьев разных форм, однако это не способствует их закаливанию в данный период. Уменьшение содержания хлорофилла в хвое текущего года формирования до 0,616–0,822 мг · г⁻¹ воздушно сухой массы наблюдается только при довольно значительном понижении температуры воздуха в начале ноября (до -1 °С). По-видимому, это способствует уменьшению количества поглощенной световой энергии в период закаливания перед перезимовкой. Содержание каротиноидов в молодой хвое резко повышается в октябре и ноябре – 0,208–0,226 и 0,220–0,268 мг · г⁻¹ воздушно сухой массы соответственно. Их защитная роль в осенний и зимний периоды возрастает.

Высокая температура воздуха летом приводит к более активному накоплению антоцианов в хвое (15,3–19,4 °С), тем самым повышая ее антиоксидантную активность. С июля по ноябрь показатель рН молодой хвои, формирующейся в текущем году, у деревьев разных форм сосны увеличивается (до 5,0), что сопряжено со снижением в хвое содержания органических кислот и повышением содержания сахаров. Значительный рост содержания аскорбиновой кислоты в хвое текущего года в июле 2018 г. (3733–4012 мкг/г) связан с засушливыми условиями в этот период (температура воздуха – 19,4 °С, количество осадков – 31 мм). Перед перезимовкой, в ноябре, повышение содержания аскорбиновой кислоты

(до 3551–3704 мкг/г) связано с действием отрицательных температур. Это свидетельствует о развитии защитных механизмов у сосны обыкновенной для предотвращения окислительного стресса. Жаркая и сухая погода в июле и особенно осеннее понижение температуры в октябре (3,5 °С) и ноябре (–1,0 °С) вызывают интенсивное накопление пролина – до 123–157 и 132–134 мкг · г⁻¹ воздушно сухой массы для форм с желтыми и красными микростробилами соответственно – в хвое текущего года формирования в ответ на экологический стресс. Увеличение содержания водорастворимых белков в хвое в октябре–ноябре до 48,2–58,6 и 47,2–60,3 мг · г⁻¹ воздушно сухой массы для форм с желтыми и красными микростробилами соответственно свидетельствует о повышении их криозащитной роли при подготовке деревьев к перезимовке.

С установлением отрицательных температур в ноябре индивидуальная изменчивость содержания аскорбиновой кислоты в хвое у сосны с желтым цветом микростробилов имеет средний уровень по шкале С.А. Мамаева (коэффициент вариации – 16 %), а у сосны с красным цветом микростробилов – низкий (коэффициент вариации – 8 %). Индивидуальная варибельность содержания пролина в ноябре у форм с желтыми микростробилами (CV = 75 %) существенно выше по сравнению с формой, имеющей красные микростробилы (CV = 48 %). Это связано с нормой реакции деревьев разных форм на влияние отрицательных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абдуллина Д.С., Петров И.В. Дифференциация популяций сосны обыкновенной по фенотипическим признакам на северо-восточном пределе ареала // Аграрн. вестн. Урала. 2012. № 9(101). С. 34–36.

Abdullina D.S., Petrov I.V. Differentiation of Populations of Scotch Pine for Phenotypical Traits in North-East Areal Boundary. *Agrarnyj Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2012, no. 9(101), pp. 34–36. (In Russ.).

2. Аверина Н.Г., Щербачков Р.А., Емельянова А.В., Доманская И.Н., Усатов А.В. Индукция накопления антоцианов и состояние защитной системы в растениях озимого рапса, обработанных 5-аминолевулиновой кислотой // Физиология растений. 2017. Т. 64, № 3. С. 173–182.

Averina N.G., Shcherbakov R.A., Emelyanova A.V., Domanskaya I.N., Usatov A.V. Induction of Anthocyanin Accumulation and Status of Protective System in Winter Rape Plants Treated with 5-aminolevulinic Acid. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2017, vol. 64, no. 3, pp. 173–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0015330317030022>

3. Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Особенности низкотемпературной адаптации хвойных Сибири: изменение содержания водорастворимых и нерастворимых компонентов клеток // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. 33, № 1-2. С. 90–94.

Alaudinova E.V., Mironov P.V. Features of Low Temperature Adaptations Coniferous of Siberia: Content Change of Water Soluble and Insoluble Components of Cells. *Khvojnye borealnoj zony* = Conifers of the Boreal Zone, 2015, vol. 33, no. 1-2, pp. 90–94. (In Russ.).

4. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.

Anuchin N.P. *Forest Taxation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).

5. Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы / сост. М.Г. Кусакина, В.И. Суворов, А.А. Чудинова. Пермь: ПГНИУ, 2012. 148 с.

Large Workshop "Biochemistry". Laboratory Classes. Ed. by M.G. Kusakima, V.I. Suvorov, A.A.Chudinova. Perm, PSU Publ., 2012. 148 p. (In Russ.).

6. Васфилов С.П. Использование pH гомогената хвои для оценки воздействия диоксида серы на сосну // Экология. 1995. № 5. С. 347–350.
Vasfilov S.P. Using the pH of Needles Homogenate to Assess the Effect of Sulfur Dioxide on Pine. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*, 1995, no. 5, pp. 347–350. (In Russ.).
7. Видякин А.И. Фены лесных древесных растений: выделение, масштабирование и использование в популяционных исследованиях (на примере *Pinus sylvestris* L.) // Экология. 2001. № 3. С. 197–202.
Vidyakin A.I. Phenotypes of Woody Plants: Identification, Scaling and Use in Population Studies (An Example of *Pinus sylvestris* L.). *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*, 2001, no. 3, pp. 197–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.1023/A:1011310111062>
8. Воскресенская О.Л., Алябышева Е.А., Половникова М.Г. Большой практикум по биоэкологии. Ч. 1. Йошкар-Ола: МарГУ, 2006. 107 с.
Voskresenskaya O.L., Alyabyшева E.A., Polovnikova M.G. *Large Workshop on Bioecology*. Part 1. Yoshkar-Ola, MarSU Publ., 2006. 107 p. (In Russ.).
9. Дымова О.В., Головкин Т.К. Фотосинтетические пигменты в растениях природной флоры таежной зоны европейского северо-востока России // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 3. С. 198–206.
Dymova O.V., Golovko T.K. Photosynthetic Pigments in Native Plants of the Taiga Zone at the European Northeast Russia. *Fiziologiya rastenij = Russian Journal of Plant Physiology*, 2019, vol. 66, no. 3, pp. 198–206. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330319030035>
10. Загирова С.В. Структура, содержание пигментов и фотосинтез хвои лиственницы сибирской на Северном и Приполярном Урале // Лесоведение. 2014. № 3. С. 3–10.
Zagirova S.V. Structure, Pigment Content and Photosynthesis of Siberian Larch Needles in the Northern and Sub-Arctic Urals. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 3, pp. 3–10. (In Russ.).
11. Изотов В.Ф. Влияние осушения на условия произрастания лесов северной подзоны тайги // Лесн. хоз-во. 1969. № 1. С. 31–37.
Izotov V.F. The Influence of Drainage on the Growing Conditions of Forests in the Northern Subzone of the Taiga. *Lesnoe khozyaistvo*, 1969, no. 1, pp. 31–37. (In Russ.).
12. Калугина О.В., Михайлова Т.А., Шергина О.В. Биохимическая адаптация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) к техногенному загрязнению // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 1. С. 98–110.
Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. Biochemical Adaptation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Technogenic Pollution. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 98–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SEJ20180109>
13. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Эколого-физиологические особенности хвойных на осушаемых землях. Архангельск: САФУ, 2010. 295 с.
Konovalov V.N., Zarubina L.V. Ecological and Physiological Characteristics of Conifers on Drained Lands. Arkhangelsk, NARFU Publ., 2010. 295 p. (In Russ.).
14. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 464 с.
Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 464 p. (In Russ.).
15. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.
Mamayev S.A. *Types of Intraspecific Variability of Woody Plants (A Case Study of the Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 284 p. (In Russ.).
16. Маслова Т.Г., Мамушина Н.С., Шерстнева О.А., Буболо Л.С., Зубкова Е.К. Структурно-функциональные изменения фотосинтетического аппарата у зимневегетирующих хвойных растений в различные сезоны года // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 5. С. 672–681.
Maslova T.G., Mamushina N.S., Sherstneva O.A., Bubolo L.S., Zubkova E.K. Structural and Functional Changes in the Photosynthetic Apparatus in Winter-Growing Conifers in Different Seasons of the Year. *Fiziologiya rastenij = Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 672–681. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1021443709050045>

17. Муравьева Д.А., Бубенчикова В.Н., Беликов В.В. Спектрофотометрическое определение суммы антоцианов в цветках василька синего // Фармация. 1987. Т. 36, № 5. С. 28–29.

Muravyeva D.A., Bubenchikova V.N., Belikov V.V. Spectrophotometric Determination of the Number of Anthocyanins in the Flowers of Blue Cornflower. *Farmakologiya*, 1987, vol. 36, no. 5, pp. 28–29. (In Russ.).

18. Новицкая Ю.Е. Физиолого-биохимические механизмы адаптации хвойных к экстремальным факторам среды // Адаптация древесных растений к экстремальным условиям среды. Петрозаводск: Кар. фил. АН СССР, 1984. С. 42–52.

Novitskaya Yu.E. Physiological and Biochemical Mechanisms of Adaptation of Conifers to Extreme Environmental Factors. *Adaptation of Woody Plants to Extreme Environmental Conditions*. Petrozavodsk, Karel'skiy filial AN SSSR Publ., 1984, pp. 42–52. (In Russ.).

19. Паршевников А.Л. Руководство по полевому исследованию лесных почв. Архангельск: АИЛиЛХ. 1974. 45 с.

Parshevnikov A.L. *Guide to Field Study of Forest Soils*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1974. 45 p. (In Russ.).

20. Петров К.А., Софронова В.Е., Бубякина В.В., Перк А.А., Татарина Т.Д., Пономарев А.Г., Чепалов В.А., Охлопкова Ж.М., Васильева И.В., Максимов Т.Х. Древесные растения Якутии и низкотемпературный стресс // Физиология растений. 2011. Т. 58, № 6. С. 866–874.

Petrov K.A., Sofronova V.E., Bubyakina V.V., Perk A.A., Tatarinova T.D., Ponomarev A.G., Chepalov V.A., Okhlopkova Z.M., Vasileva I.V., Maximov T.C. Woody Plants of Yakutia and Low-Temperature Stress. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2011, vol. 58, no. 6, pp. 866–874. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1021443711060148>

21. Полевая геоботаника / под общ. ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. Т. 3. М.; Л.: Наука, 1964. 531 с.

Field Geobotany. Ed. by E.M. Lavrenko, A.A. Korchagina. Vol. 3. Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1964. 531 p. (In Russ.).

22. Полесская О.Г. Растительная клетка и активные формы кислорода. М.: КДУ, 2007. 140 с.

Poleskaya O.G. *Plant Cell and Reactive Oxygen Species*. Moscow, KDU Publ., 2007. 140 p. (In Russ.).

23. Попов П.П. Географическая изменчивость формы семенных чешуй ели в Восточной Европе и Западной Сибири // Лесоведение. 1999. № 1. С. 68–73.

Popov P.P. Geographic Variation in the Shape of Spruce Seed Scales in Eastern Europe and Western Siberia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1999, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.).

24. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 192 с.

Pravdin L.F. *Scots Pine. Variability, Intraspecific Systematics and Breeding*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 192 p. (In Russ.).

25. Практикум по физиологии растений / под ред. Н.Н. Третьякова, Т.В. Карнауховой, Л.А. Паничкина и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.

Workshop on Plant Physiology. Ed. by N.N. Tretyakova. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 271 p. (In Russ.).

26. Путенихин В.П. Популяционная структура и сохранение генофонда хвойных видов на Урале: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 2000. 48 с.

Putenikhin V.P. *Population Structure and Conservation of the Coniferous Species Gene Pool in the Urals*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 2000. 48 p. (In Russ.).

27. Софронова В.Е., Чепалов В.А., Дымова О.В., Головки Т.К. Роль пигментной системы вечнозеленого кустарничка *Ephedra monosperma* в адаптации к климату Центральной Якутии // Физиология растений. 2014. Т. 61, № 2. С. 266–274.

Sofronova V.E., Chepalov V.A., Dymova O.V., Golovko T.K. The Role of Pigment System of an Evergreen Dwarf Shrub *Ephedra monosperma* in Adaptation to the Climate

- of Central Yakutia. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2014, vol. 61, no. 2, pp. 266–274. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S001533031401014X>
28. Судаchkova Н.Е. Состояние и перспективы изучения влияния стрессов на древесные растения // Лесоведение. 1998. № 2. С. 3–9.
Sudachkova N.E. State and Perspectives of Studying the Effect of Stress on Wood Plants. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1998, no. 2, pp. 3–9. (In Russ.).
29. Судаchkova Н.Е., Милютин И.Л., Романова Л.И. Биохимическая адаптация хвойных к стрессовым условиям Сибири. Новосибирск: Гео, 2012. 178 с.
Sudachkova N.E., Milyutina I.L., Romanova L.I. *Biochemical Adaptation of Conifers to the Stressful Conditions of Siberia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2012. 178 p. (In Russ.).
30. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: АН СССР, 1961. 144 с.
Sukachev V.N., Zonn S.V. *Guidelines for Studying Forest Types*. Moscow, AN SSSR Publ., 1961. 144 p. (In Russ.).
31. Теребова Е.Н., Галибина Н.А., Сазонова Т.А., Таланова Т.Ю. Индивидуальная изменчивость метаболических показателей ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение. 2003. № 1. С. 72–77.
Terebova E.N., Galibina N.A., Sazonova T.A., Talanova T.Yu. Individual Variability of Metabolic Indices in Assimilative Apparatus of Scots Pine Under Industrial Pollution. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2003, no. 1, pp. 72–77. (In Russ.).
32. Яцко Я.Н., Дымова О.В., Головки Т.К. Пигментный комплекс зимне- и вечнозеленых растений в подзоне средней тайги Европейского Северо-Востока // Ботанич. журн. 2009. Т. 94, № 12. С. 1812–1820.
Yatsko Ya.N., Dymova O.V., Golovko T.K. Pigment Complex of Ever- and Wintergreen Plants in the Middle Taiga Subzone of the European North-East. *Botanicheskij zhurnal* = Russian Journal of Botany, 2009, vol. 94, no. 12, pp. 1812–1820. (In Russ.).
33. Almagro L., Gomez Ros L.V., Belchi-Navarro S., Bru R., Ros Barcelo A., Pedreno M.A. Class III Peroxidases in Plant Defense Reactions. *Journal of Experimental Botany*, 2009, vol. 60, iss. 2, pp. 377–390. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern277>
34. Aquil S., Ahmad S.H., Reshi Z.A., Iqbal M. Physiological and Biochemical Response of *Albizia lebbek* Benth to Coal Smoke Pollution. *Pollution Research*, 2003, vol. 22, iss. 44, pp. 489–493.
35. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Plant and Soil*, 1973, vol. 39, iss. 1, pp. 205–207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
36. Björkman O. Responses to Different Quantum Flux Densities. *Physiological Plant Ecology I. Responses to the Physical Environment*. Ed. by O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond, H. Ziegler. Berlin, Springer-Verlag Publ., 1981. pp. 57–107. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8_4
37. Black A.R., Subjeck J.R. Mechanisms of Stress-Induced Thermo- and Chemotolerances. *Stress Proteins. Induction and Function*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 1990. pp. 101–117. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75815-7_9
38. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V. Antioxidants, Oxidative Damage and Oxygen Deprivation Stress: A Review. *Annals of Botany*, 2003, vol. 91, iss. 2, pp. 179–194. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf118>
39. Davies K.M., Schwinn K.E. Molecular Biology and Biotechnology of Flavonoid Biosynthesis. *Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications*. London, CRC Press Publ., 2005. pp. 143–218. <https://doi.org/10.1201/9781420039443.ch3>
40. Demming-Adams B., Gilmore A.M., Adams W.W. *In vivo* Function of Carotenoids in Higher Plants. *FASEB Journal*, 1996, vol. 10, iss. 4, pp. 403–412. <https://doi.org/10.1096/fasebj.10.4.8647339>
41. Ivanov L.A., Ivanova L.A., Ronzhina D.A., Yudina P.K. Changes in the Chlorophyll and Carotenoid Contents in the Leaves of Steppe Plants Along a Latitudinal Gradient in South Ural. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2013, vol. 60, no. 6, pp. 812–820. <https://doi.org/10.1134/S1021443713050075>

42. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*. Vol. 148. Elsevier Publ., 1987. pp. 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
43. Matysik J. Alia, Bhalu B., Mohanty P. Molecular Mechanisms of Quenching of Reactive Oxygen Species by Proline Under Stress in Plants. *Current Science*, 2002, vol. 82, iss. 5, pp. 525–532.
44. Mittler R. Oxidative Stress, Antioxidants and Stress Tolerance. *Trends in Plant Science*, 2002, vol. 7, iss. 9, pp. 405–410. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)
45. Oquist G., Huner N.P.A. Photosynthesis of Overwintering Evergreen Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, vol. 54, no. 1, pp. 329–355. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.072402.115741>
46. Roohi A., Nazish B., Nabgha-e-Amen, Maleeha M., Waseem S. A Critical Review on Halophytes: Salt Tolerant Plants. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2011, vol. 5, iss. 33, pp. 7108–7118. <https://doi.org/10.5897/JMPRx11.009>
47. Scheer H. The Pigments. *Light-Harvesting Antennas in Photosynthesis. Book Series: Advances in Photosynthesis and Respiration*. Ed. by B.R. Green, W.W. Parson. Dordrecht, Springer Publ., 2003. pp. 29–81. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2087-8_2
48. Schödel R., Irrgang K.-D., Voigt J., Renger G. Quenching of Chlorophyll Fluorescence by Triplets in Solubilized Light-Harvesting Complex II (LHCII). *Biophysical Journal*, 1999, vol. 76, iss. 4, pp. 2238–2248. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(99\)77380-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(99)77380-7)
49. Siefferman-Harms D. The Light-Harvesting and Protective Functions of Carotenoids in Photosynthetic Membranes. *Physiologia Plantarum*, 1987, vol. 69, iss. 3, pp. 561–568. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1987.tb09240.x>
50. Smillie R.M., Hetherington S.E. Photoabatement by Anthocyanin Shields Photosynthetic Systems from Light Stress. *Photosynthetica*, 1999, vol. 36, pp. 451–463.
51. Szabados L., Savoure A. Proline: A Multifunctional Amino Acid. *Trends in Plant Science*, 2010, vol. 15, iss. 2, pp. 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>
52. Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Y.E. Adaptive Responses of Morphological Forms of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Under Stressful Conditions of the Northern Taiga (in the Northern Dvina Basin). *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 377–387. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040091>
53. Zhang J., Kirkham M.B. Drought-Stress-Induced Changes in Activities of Superoxide Dismutase, Catalase, and Peroxidase in Wheat Species. *Plant and Cell Physiology*, 1994, vol. 35, iss. 5, pp. 785–791. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a078658>

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*232.423:630*232.43

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-76-92

Создание лесных культур сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) на бугристых песках в степной зоне России

Т.А. Турчина¹✉, д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAT-8537-2020](https://orcid.org/0000-0001-9287-7544),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9287-7544>

О.А. Банникова², канд. с.-х. наук; ResearcherID: [ABD-2525-2021](https://orcid.org/0000-0002-0490-8812),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0490-8812>

¹Красноярский научный центр СО РАН – Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики, ул. Комсомольская, д. 1, г. Норильск, Красноярский край, Россия, 663302; tatturchina@mail.ru✉

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства – Южно-европейская научно-исследовательская лесная опытная станция, ул. Сосновая, д. 59 в, ст. Вешенская, Шолоховский р-н, Ростовская обл., Россия, 346270; olga_kowalewa@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.21 / Одобрена после рецензирования 22.07.21 / Принята к печати 06.08.21

Аннотация. На песках и песчаных почвах степной зоны европейской части России в период 2009–2020 гг. создавались лесные культуры сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don). При анализе причин низкой эффективности лесовосстановления авторами предложена гипотеза о том, что правила посадки, рекомендуемые для сосны обыкновенной в части величины заглубления корневой шейки и обычно применяемые для сосны крымской, для последней могут быть неприемлемыми. Цель работы – на основе анализа динамики приживаемости и сохранности растений в лесных культурах на бугристых песках обосновать необходимость заглубления корневой шейки сеянцев и наиболее оптимальную величину заглубления. Экспериментальные лесные культуры созданы в 2017 г. Испытаны варианты глубины расположения корневой шейки растений относительно поверхности почвы 0, 2, 4, 6 см и до начала охвоенной части сеянца. Контролем служили лесные культуры, созданные механизированным способом, при котором глубина посадки растений составляла 6 см и более. При посадке вручную максимальная приживаемость (94,2–94,6 % в 1-й год) и сохранность растений (67,0–94,6 % на 4-й год), а также их наиболее равномерное распределение по лесокультурной площади (коэффициент вариации – 6,6–28,8 %) выявлены в вариантах с глубиной посадки 2 и 4 см. Отсутствие заглубления и глубокая посадка (на 6 см) приводят к уменьшению приживаемости и сохранности растений на 7,6–18,6 % и увеличению диапазона варьирования этих показателей (10,2–60,6 %). При механизированной посадке с заглублением корневой шейки на 6 см и более количество сохранившихся растений минимально (58,4 и 32,7 % – в 1-й и 4-й годы соответственно), а вариация показателя максимальная (30,5–70,1 %). Аналитическое выравнивание возрастной динамики густоты показало, что прогнозируемая густота не достигнет нормативной величины в вариантах при отсутствии заглубления и при глубокой посадке сеянцев. Установленные статистически значимые различия приживаемости лесных культур на протяжении всего периода наблюдений ($t_{\phi} = 2,12-4,38 > t_{05} = 2,12-2,45$) свидетельствуют о целесо-

образности заглубления корневой шейки при посадке растений. Оптимальной ее величиной следует считать 2–4 см, но не более чем до начала охвоенной части сеянца.

Ключевые слова: степная зона, бугристые пески, сосна обыкновенная, сосна крымская, сеянцы, величина заглубления корневой шейки, лесные культуры, приживаемость, сохранность растений

Для цитирования: Турчина Т.А., Банникова О.А. Создание лесных культур сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) на бугристых песках в степной зоне России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 76–92. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-76-92>

Original article

Creation of Forest Cultures of Crimean Pine (*Pinus pallasiana* D. Don) on the Hilly Sands in the Steppe Zone of Russia

Tatiana A. Turchina¹✉, Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist;
ResearcherID: [AAT-8537-2020](https://orcid.org/0000-0001-9287-7544), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9287-7544>
Olga A. Bannikova², Candidate of Agriculture; ResearcherID: [ABD-2525-2021](https://orcid.org/0000-0002-0490-8812),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0490-8812>

¹Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic within Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Komsomolskaya, 1, Norilsk, Krasnoyarskiy krai, 663302, Russian Federation; tatturchina@mail.ru✉

²South European Forest Research Experimental Station that belongs to All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Sosnovaya, 59v, stanitsa Veshenskaya, rayon Sholokhovskiy, Rostov region, 346270, Russian Federation; olga_kowalewa@mail.ru

Received on April 06, 2021 / Approved after reviewing on July 22, 2021 / Accepted on August 06, 2021

Abstract. Forest crop cultivation of Crimean pine (*Pinus pallasiana* D. Don) was implemented in 2009–2020 on sandy and sand included soils in the steppe zone of the European part of Russia. During the analysis of the reasons for the low efficiency of reforestation, the authors proposed the hypothesis that the rules of planting recommended for Scots pine relative to the depth of rooting may not be acceptable for Crimean pine. The purpose of the work is to substantiate the necessity and the most optimal value of deepening the root collar of Crimean pine seedlings on hilly sands. Experimental forest cultures were planted in 2017. The depth of the plant collar relative to the soil surface was tested at 0, 2, 4, 6 cm, and until the seedling's foliated part. The reference group was created by machine cultivation, which required a rooting depth of 6 cm or more. In the case of hand cultivation, the variants with planting depths of 2 and 4 cm had the highest rates of plant survival (94.2–94.6 % in the first year), plant safety (67.0–94.6 % in the fourth year), and their most even distribution over the silvicultural area (variation coefficient (v) at 6.6–28.8 %). The lack of deepening and very deep planting by 6 cm led to a decrease in plant survival and preservation by 7.6–18.6 % with an increase in the range of the variation coefficient (v , 10.2–60.6 %). The mechanized planting with a root collar depth over 6 cm gave the lowest number of preserved plants (58.4 % in the first year, 32.7 % in the fourth year), and the greatest range for the variation coefficient (v , 30.5–70.1 %). An analytical equalization of the density of age dynamics showed that the predicted density would

not reach the normative value with low and very deep planting. The established statistically significant differences in the survival rate of forest cultures throughout the observation period ($t_f = 2.12-4.38 > t_{05} = 2.12-2.45$) indicated the expediency of deepening the root collar. The optimal value is 2–4 cm, but until the seedling's foliated part.

Keywords: steppe zone, hilly sands, Scots pine, Crimean pine, seedlings, depth of root collar, forest cultures, survival rate, plant safety

For citation: Turchina T.A., Bannikova O.A. Creation of Forest Cultures of Crimean Pine (*Pinus pallasiana* D. Don) on the Hilly Sands in the Steppe Zone of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 76–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-76-92>

Введение

Бугристые пески, по разным оценочным данным, занимают от 30 до 80 % общей площади песчаных массивов степной зоны России [2, 3, 12, 13]. В силу орографических особенностей, гранулометрического состава (преобладание средне- и крупнозернистых фракций песка при доле физической глины не более 10 %), низкого плодородия (гумусовый горизонт отсутствует или погребен, содержание гумуса не превышает 2–3 %), особых водно-физических свойств (низкая влагоемкость и высокая водопроницаемость) бугристые пески справедливо считаются наиболее сложным объектом для лесомелиоративного освоения [2, 3, 12]. Поэтому созданные на них лесные насаждения (преимущественно из хвойных пород) имеют исключительное мелиоративное значение, в некоторых случаях являются источником получения древесины для утилитарных целей и местной деревообрабатывающей промышленности [2, 5, 10].

Гибель лесных насаждений, происходящая преимущественно вследствие воздействия пирогенного фактора антропогенной природы, способствует «возврату площадей» в фонд лесовосстановления. Согласно данным, представленным в проектах лесовосстановления, в период 2009–2020 гг. на территории Ростовской области большая часть участков для создания лесных культур сосны крымской (97,1 %) предоставлялась именно в условиях мелко- и среднебугристого рельефа [6].

К сожалению, эффективность лесовосстановления в регионе низкая. В указанный выше период примерно половина площади созданных лесных культур из-за несоответствия нормативным параметрам приживаемости (приказ Минприроды России от 04.12.2020 № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений») была списана. Преобладающей причиной гибели называется климатический фактор – неблагоприятные погодные условия. Возможными причинами также являются недостаточное финансирование, использование машин и механизмов с высокой долей физического износа, игнорирование необходимости экологической дифференциации отдельных технологических операций и некоторые другие [4, 11, 12].

Особые экологические условия песков ограничивают перечень выращиваемых древесных пород. Чаще всего используются олиготрофные виды, из которых преимущественное распространение получила сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) [2–4]. Многолетней практикой лесомелиорации выработаны основные правила посадки растений. Среди индикаторов ее качества выделим два:

1. корневая шейка растений должна находиться на уровне поверхности почвы или иметь незначительное заглубление;
2. корневая система растений должна иметь целостную структуру.

Если в отношении второго показателя экспертная оценка едина, то мнения относительно необходимости заглубления корневой шейки сеянцев и ее величины являются предметом дискуссии. На начальном этапе освоения бугристых песков (первая половина XX в.), когда преобладал ручной способ создания лесных культур, заглублять корневую шейку не рекомендовалось. При внедрении средств механизации начала действовать другая рекомендация: корневую шейку необходимо располагать ниже уровня поверхности почвы. При этом оптимальная величина заглубления, указываемая разными авторами, была различная [2, 3, 9, 10]. В 70-х гг. XX в. считалось, что корневая шейка растений на песчаных и супесчаных почвах должна заделываться на глубину 6–8 см ниже уровня поверхности [3]. В начале XXI в. рекомендованной величиной заглубления является 2–3 см [9]. Н.С. Зюзь [2] в качестве оптимальной предложил относительную величину заглубления – половину высоты стволика. Аналогичное мнение высказывал И.Г. Сурхаев [10], считающий, что заглубление растений в почву до 1/2–2/3 высоты стволика является одним из наиболее надежных средств повышения приживаемости культур на песках и песчаных почвах. Научного обоснования вышеуказанных рекомендаций авторы, к сожалению, не приводят.

С начала XXI в. на бугристых песках создаются преимущественно лесные культуры сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) и основным используемым посадочным материалом являются 2-летние сеянцы. Эта древесная порода, как сообщается в приказе Минприроды России № 1014 и в [9, 20], толерантна к степным условиям, лучшими для ее роста и развития являются почвы супесчаного и суглинистого гранулометрического состава [13, 22]. Мнения исследователей по поводу реакции сосны крымской на засуху расходятся: от устойчивости [10] до чувствительности [15, 17, 18]. Приоритетное использование сосны крымской обусловлено также более высоким в сравнении с сосной обыкновенной аэромелиоративным эффектом. Насаждения сосны крымской при условии выращивания на полиминеральных песках обладают большей углероддепонирующей и кислородпродуцирующей функцией [5].

В регионе отсутствует адаптированная для сосны крымской технология создания лесных культур. Используются перечень, последовательность и кратность технологических операций, предусмотренных для сосны обыкновенной. То же касается и правил посадки – величина заглубления корневой шейки составляет 6–8 см, как и для сосны обыкновенной.

Из-за орографических особенностей бугристых песков на их разных участках складываются различные условия для роста и развития растений. Дефляционные процессы, возникающие практически сразу после создания лесных культур, приводят к нивелированию профиля борозды, выветриванию илистых фракций и, как следствие, повреждению высаженных растений [13]. В межбугровых понижениях и на нижних частях склонов культивируемые растения засыпаются песком, а на вершинах и верхних частях склонов бугров, наоборот, наблюдается обнажение корневой системы сеянцев. С одной стороны, игнорирование особенностей мезо- и микрорельефа лесокультурных площадей

приводит к снижению приживаемости и оказывает отрицательное влияние на рост лесных культур, но с другой, лесопосадочные машины (СБН-1, СЛН-1, МЛУ-1) сконструированы таким образом, что сажальщики сидят спиной к направлению движения трактора и орографические различия замечают не сразу. «В зону риска» в первую очередь попадают сеянцы, имеющие значительную величину заглубления корневой шейки.

При видимом отсутствии или незначительном проявлении дефляции причиной гибели растений при глубокой посадке может быть нарушение физиологических процессов. При неглубокой посадке зона проведения корня практически всегда оказывается в сухом почвенном слое, тем самым нарушается водоснабжение растений, особенно в период засухи. При сильном заглублении и последующем засыпании заметно снижаются процессы фотосинтеза. Зеленая надземная часть растения находится под слоем песка именно в тот период (май, июнь), когда содержание хлорофилла в хвое обычно увеличивается [17].

Кроме того, в ксерофитных гигротопах в хвое сосны крымской наблюдается снижение концентрации общего хлорофилла в сравнении с более благоприятными по увлажнению условиями [15, 18]. При снижении концентрации хлорофилла замедляются процессы фотосинтеза, что приводит к уменьшению устойчивости растений. Следовательно, сеянцы с засыпанной землей (частично или полностью) фотосинтезирующим аппаратом в период адаптации к новым лесорастительным условиям не получают достаточного количества органических веществ для роста и развития.

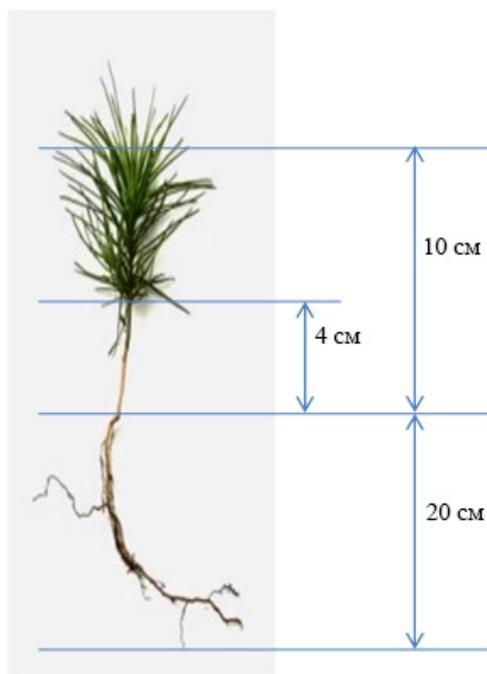
Как видно, биологическая значимость заглубления корневой шейки сеянцев сосны крымской на песках и песчаных почвах изучена мало. Поэтому исследование степени влияния заглубления корневой шейки сеянцев имеет большое теоретическое и практическое значение.

Рекомендации по заглублению корневой шейки растений при посадке имеют, возможно, и физическое обоснование. В соответствии с требованиями приказа Минприроды России № 1014, стандартные 2-летние сеянцы сосны крымской должны иметь следующие минимальные биометрические показатели: высоту надземной части – 10 см, диаметр корневой шейки – 3 мм (рис. 1). Требования к показателям массы предусмотрены не во всех странах, где культивируется эта древесная порода, хотя для сеянцев характерна диспропорция между массой надземной и подземной частей растений [7, 8, 14, 19, 21]. В зависимости от региона происхождения семян и выращивания сеянцев, лесорастительных условий в питомниках, применяемых технологий, наличия или отсутствия средств биостимулирующего воздействия превышение массовых показателей надземной части сеянцев над подземной может составлять от 1,2–2,2 [14, 19, 21] до 4,1–6,8 [7, 8] раза. Диспропорция показателей массы в случае мелкой посадки может привести к отсутствию физической устойчивости растений.

Так как рост корней начинается не сразу, при деструктуризации песчаных почв в процессе их высыхания сцепление корневой системы с грунтом ухудшается и возможно «падение» сеянцев под действием «собственной массы», особенно при скорости ветра от 5 м/с [13, 16]. Именно за счет заглубления части стволика в почву может быть достигнуто усиление физической устойчивости растения. Примеры отрицательных последствий глубокой посадки приведены выше.

Рис. 1. Биометрические показатели стандартных сеянцев сосны крымской (средние данные)

Fig. 1. Biometric indicators of the standard Crimean pine seedlings (average data)



Таким образом, правила посадки растений сосны обыкновенной в части величины заглубления корневой шейки и необходимости установления ее оптимальной величины не могут быть механически перенесены на сосну крымскую. Для этой древесной породы необходима разработка собственных рекомендаций.

Цель исследования – обосновать необходимость заглубления корневой шейки сеянцев сосны крымской и наиболее оптимальную величину заглубления при создании лесных культур на бугристых песках.

Задачи: проанализировать динамику приживаемости лесных культур; выявить влияние величины заглубления корневой шейки сеянцев на вариабельность приживаемости и сохранности растений.

Объекты и методы исследования

Для реализации цели и задач исследования весной 2017 г. в условиях среднебугристого рельефа на связнопесчаной мелкозернистой дерновой почве создан опытный объект – лесные культуры сосны крымской. Местоположение объекта: Шолоховское лесничество (Ростовская область), Колундаевское участковое лесничество, квартал 30, выдел 13 (49°43'16,8" с. ш. 41°44'40,3" в. д.). Использованные технологические приемы, перечень машин и механизмов, а также варианты опыта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры вариантов опыта
Technological parameters of the experiment options

Технологические операции			Схема размещения растений, м	Заглубление корневой шейки сеянцев, см	Индекс опыта*
Обработка почвы	Посадка	Агротехнические уходы, год – количество			
Нарезка борозд (РН-60) осенью предшествующего года	Вручную (под лопату) – опытные варианты	Рыхление почвы (КЛБ-1,7): 2017 – 5; 2018 – 4; 2019 – 3	3×0,7	0	P0
				2	P2
				4	P4
				6	P6
				до начала охвоенной части сеянца	PX
	Механизированная (СЛЧ-1, МЛУ-1) – контроль		3×0,8	6 и более	M6

* Первая буква в аббревиатуре обозначает способ создания лесных культур, последующее цифровое и буквенное обозначение – величину заглубления корневой шейки при посадке.

Для создания лесных культур использовались 2-летние сеянцы, выращенные в Пигаревском лесном питомнике (базовый питомник территориального лесничества) и по биометрическим показателям соответствующие критериям и требованиям к посадочному материалу для лесовосстановления в районе степей европейской части Российской Федерации (приказ Минприроды России № 1014). Контрольным вариантом являлись лесные культуры, созданные механизированным способом по проекту лесовосстановления [6]. Предпосадочная подготовка сеянцев заключалась в подрезке корневых систем и обработке их почвенно-водной суспензией (болтушка) перед загрузкой в бункер лесопосадочной машины.

В опытных вариантах лесные культуры созданы вручную с шагом посадки 0,7 м с вариацией величины заглубления корневой шейки при посадке от 0 см (без заглубления) до 6 см или до начала охвоенной части сеянца (4–5 см). Повторность опыта – 5–9-кратная (по 100 растений в каждой). Перед посадкой растений проведена тренировка визуализации величины заглубления корневой шейки: сначала требуемую величину обозначали с помощью линейки, впоследствии она определялась в полевых условиях глазомерно.

Обследование лесных культур проводилось в 2017–2020 гг. дважды в год: в начале вегетационного периода и по его окончании. Состояние лесных культур оценивалось по динамике отпада растений и приживаемости. Первую (%) определяли с интервалом в полгода по разности данных приживаемости в конце периода (весенне-летнего или осенне-зимнего) и предыдущего значения. Вторую (%) вычисляли как отношение числа жизнеспособных растений к общему числу посадочных мест.

Статистическая обработка результатов исследований выполнялась в программе Microsoft Excel и системе Statistica [1]. По полученным данным строились диаграммы, где для отражения величины ошибки средней приживаемости использовали планку погрешности. Для определения степени влияния заглубления корневой шейки сеянцев использовали коэффициент Стьюдента (t) как критерий достоверности разности средних значений на 5%-м уровне значимости.

Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее важным в развитии искусственно созданного насаждения является 1-й год. В этот период происходит адаптация высаженных растений к новым лесорастительным условиям. Плановая инвентаризация лесных культур, выполняемая по итогам 1-го вегетационного периода, позволяет установить эффективность проведенного мероприятия и принять решение о необходимости агротехнических уходов в виде дополнения лесных культур при приживаемости 25–85 % или об отнесении лесных культур к погибшим и их последующем списании при приживаемости менее 25 % (в соответствии с приказом Минприроды России № 1014).

В общей оценке эффективности лесовосстановления показатели приживаемости и гибели растений (отпад) являются взаимозависимыми и обратно сопряженными, т. е. чем меньше отпад, тем больше приживаемость и наоборот. Поэтому применительно к объекту исследования считаем целесообразным анализ обоих показателей.

Особенность климата степной зоны – наличие в разные периоды года комплекса неблагоприятных абиотических факторов. В весенне-летний период это высокие температуры, суховеи, отсутствие осадков; в осенне-зимний – ранние заморозки, длительное воздействие низких температур, отсутствие снежного покрова. Уже в самом начале вегетации происходит быстрое нарастание температуры воздуха, что в совокупности с отсутствием осадков приводит к иссушению верхнего почвенного горизонта. Следствием этого становится нарушение процессов водообмена у неадаптированных к новым экологическим условиям растений, приводящее к их гибели. Даже при условии, что вегетационные периоды 2017–2019 гг. имели лучшие в сравнении со среднемноголетними значениями показатели влагообеспеченности [13], закономерно, что во всех вариантах опыта наибольшее количество погибших растений фиксируется именно в 1-й год роста лесных культур (табл. 2). В последующие периоды этот показатель относительно стабилен и его максимальная величина не превышает 10 %.

Динамика отпада растений в зависимости от способа создания лесных культур и применявшихся вариантов посадки имеет некоторые закономерности (в каждом последующем периоде – весенне-летний и осенне-зимний – отпад меньше, чем в предшествующем) и особенности, связанные, в том числе, с биологическими свойствами сосны крымской. При механизированной посадке из 60,1 % погибших в 1-й год растений (максимальный из всех вариантов показатель) абсолютное большинство приходится на весенне-летний период. Меньшая по величине отпада, но идентичная тенденция наблюдается и в вариантах ручной посадки с максимальным заглублением корневой шейки (на 6 см и до начала охвоенной части сеянца). Причиной гибели растений является частичное или полное уничтожение при посадке и агротехнических уходах фотосинтезирующего аппарата.

Таблица 2

Динамика отпада растений в лесных культурах сосны крымской
Dynamics of plant mortality in forest cultures of Crimean pine

Год роста лесных культур	Период роста лесных культур	Отпад растений при способе создания (%)					механизи- рованный
		вручную с заглублением корневой шейки на (см)					
		0	2	4	6	до начала охвоенной части сеянца	
1-й	Весенне-летний	12,3–13,6	5,0–5,8	3,7–8,3	11,7–19,3	12,8	41,6
	Осенне-зимний	9,4–21,6	8,4–17,2	8,0–12,5	1,3–15,0	9,3	18,5
2-й	Весенне-летний	7,4–10,0	2,4–6,2	4,5–13,4	11,1–28,7	4,0	1,5
	Осенне-зимний	0,4–0,5	0,4–10,0	0–0,8	0,5–5,8	0,1	0,3
3-й	Весенне-летний	0,6–4,7	0–1,7	0,3–1,6	1,6–3,2	4,5	0,8
	Осенне-зимний	0,2–2,5	2,7–5,0	2,5–5,4	0–0,1	1,3	4,6
4-й	Весенне-летний						

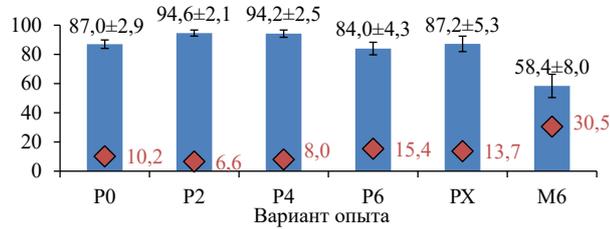
В вариантах посадки, когда охвоенная часть полностью находится на поверхности, больше всего растений погибает в осенне-зимний период, что связано с негативным воздействием низких температур (особенно в начале периода) на достаточно требовательную к теплу сосну крымскую. Дополнительным фактором, приводящим к гибели растений в варианте посадки без заглубления корневой шейки (вариант P0), является обнажение у них зоны проведения корней под действием дефляционных процессов в весенне-летний период и последующее их подмерзание в осенне-зимний.

На протяжении всего периода наблюдений изменение доли сохранившихся растений (приживаемость) и вариация этого показателя имеют особенности, связанные как со способом создания лесных культур, так и с вариантом посадки (рис. 2).

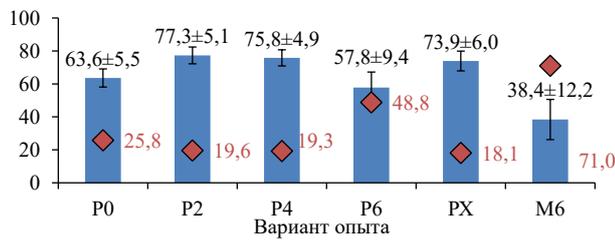
По результатам инвентаризации (1-й год), приживаемость лесных культур при механизированной посадке составила 58,4 % и при посадке вручную – 84,0–94,6 %. В случаях, когда фактическая приживаемость была меньше запроецированного показателя 65 % [6], весной 2018 г. проведено дополнение лесных культур до исходной густоты. Как показывают данные (рис. 2), выполненный агротехнический уход не повысил эффективность лесовосстановления. Приживаемость лесных культур в сравнении с вариантами посадки вручную меньше в 1,51–2,01 раза – на 2-й год, в 1,39–1,99 раза – на 3-й, в 1,58–2,15 раза – на 4-й.

При сравнении приживаемости лесных культур в вариантах ручного способа создания выявляются различия, связанные с величиной заглубления корневой шейки растений. При глубокой посадке (на 6 см), равно как и при отсутствии заглубления, начиная со 2-го года роста приживаемость растений минимальна: 57,8–63,6; 51,9–60,3 и 51,8–58,8 % на 2–4-й годы соответственно.

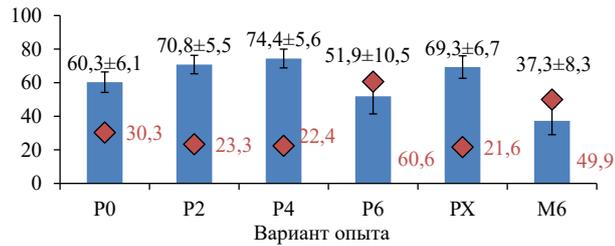
Бóльшие значения отмечены в вариантах с заглублением корневой шейки на 2, 4 см и до начала охвоенной части сеянца. Различия составили 10,3–19,5 % – на 2-й год, 9,0–22,5 % – на 3-й, 8,2–18,6 % – на 4-й.



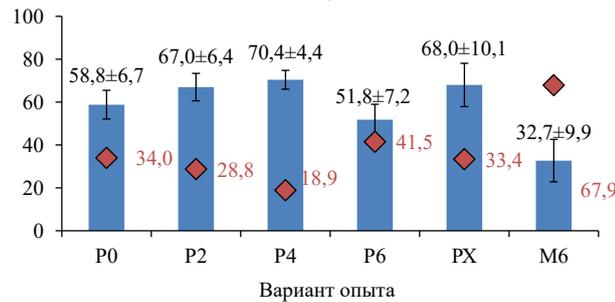
a



б



в



Вариант опыта

■ Средняя приживаемость, % ◆ Коэффициент вариации, %

г

Рис. 2. Приживаемость лесных культур сосны крымской по вариантам опыта: а – 2017; б – 2018; в – 2019; г – 2020 г. (на столбцах диаграммы указана средняя приживаемость на конец вегетационного периода и ошибка ее определения)

Fig. 2. Survival of Crimean pine forest cultures by the experience options: а – 2017; б – 2018; в – 2019; г – 2020 years (the diagram columns show the average rooting rate at the end of the vegetation period and the error in determining it)

Таким образом, существенное влияние на приживаемость лесных культур оказывают и способ их создания, и величина заглубления корневой шейки сеянцев при посадке.

Кроме приживаемости в качестве показателя эффективности лесовосстановления выступает равномерность размещения сохранившихся растений по площади участка. Индикатором ее оценки является коэффициент вариации. При создании лесных культур вручную в 1-й год роста варьирование средней приживаемости (6,6–15,4 %) не превысило средний уровень изменчивости и лесные культуры соответствуют однородной совокупности (рис. 2). Гибель растений впоследствии приводит к увеличению изменчивости приживаемости. Минимальное варьирование признака, не выходящее за границы однородной совокупности (33 %), наблюдается в вариантах посадки сеянцев с заглублением корневой шейки на 2, 4 см и до начала охвоенной части сеянца. В случаях P0 и P6 вариация приживаемости составляет 25,8–48,8 % на 2-й год роста лесных культур, 30,3–60,6 % – на 3-й год, 34,0–41,5 % – на 4-й. Доля сохранившихся растений здесь минимальна, а вариация признака максимальна, что является следствием неравномерного размещения растений по лесокультурной площади. Еще более неравномерное распределение растений отмечается при механизированном способе создания лесных культур: варьирование приживаемости составляет 71,0; 49,9 и 67,9 % на 2–4-й годы роста соответственно.

Статистически значимые различия приживаемости лесных культур ($t_{\phi} > t_{05}$) выявлены для механизированного способа создания по всем вариантам ручной посадки при заглублении корневой шейки растений до 6 см и фиксируются в течение всего периода наблюдений (табл. 3).

Таблица 3

Существенность различий (по Стьюденту) приживаемости лесных культур сосны крымской с различным заглублением корневой шейки сеянцев при посадке
Significance of differences (according to Student's test) in the survival rate of Crimean pine forest cultures with different depth of the plant collar of seedlings during planting

Сравниваемые варианты	Коэффициент существенности различий на момент окончания вегетационного периода для года			
	2017	2018	2019	2020
P0–P2	2,12	1,83	1,28	0,89
P0–P4	1,88	1,66	1,70	1,45
P0–P6	0,58	0,53	0,69	0,71
P0–PX	0,03	1,27	0,99	0,76
P0–M6	3,36	1,88	2,23	2,18
P2–P4	0,12	0,21	0,46	0,44
P2–P6	2,22	1,82	1,59	1,58
P2–PX	1,30	0,43	0,17	0,08
P2–M6	4,38	2,94	3,36	2,91
P4–P6	2,05	1,70	1,89	2,20
P4–PX	1,19	0,25	0,58	0,22
P4–M6	4,27	2,84	3,71	3,48
P6–PX	0,47	1,44	1,40	1,31
P6–M6	2,82	1,26	1,09	1,56
PX–M6	3,00	2,61	3,00	2,50

Примечание: Полужирным шрифтом выделены коэффициенты Стьюдента больше стандартного значения на 5%-м уровне ($t_{05} = 2,12–2,45$).

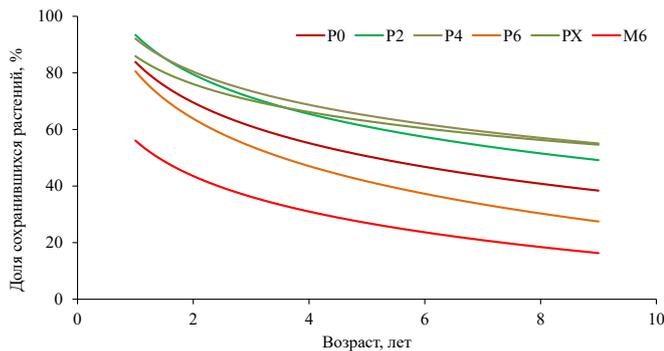
Максимальное фактическое значение коэффициента Стьюдента в этих вариантах наблюдается по окончании вегетационного периода 1-го года роста лесных культур ($t_{\phi} = 3,0-4,38 > t_{05} = 2,12-2,45$). С течением времени коэффициент уменьшается, тенденция характерна для всех сравниваемых вариантов, но статистически значимые различия сохраняются. Приближенным по эффективности к механизированному способу является ручная посадка с максимальным заглублением корневой шейки растений (вариант Р6). Здесь значимые различия приживаемости фиксируются только в 1-й год (табл. 3). Это означает, что независимо от способа создания лесных культур глубокая посадка растений (с погребением фотосинтезирующего аппарата) одинаково опасна. В вариантах ручного способа создания лесных культур значимость различий приживаемости в зависимости от величины заглубления корневой шейки сеянцев проявляется по-разному. При сравнении вариантов заглубления корневой шейки, которые по другим показателям были признаны оптимальными (Р2, Р4, РХ), статистически значимые различия приживаемости не установлены ($t_{\phi} = 0,12-1,30 < t_{05} = 2,12-2,45$). В вариантах с отсутствием заглубления (Р0) и с максимальной его величиной (Р6) статистически значимые различия фиксируются в 1-й ($t_{\phi} = 2,12 \geq t_{05} = 2,12$) и в 4-й годы роста лесных культур ($t_{\phi} = 2,20 > t_{05} = 2,12$) соответственно.

Независимо от происхождения насаждения (естественное или искусственное) в нем происходит закономерное уменьшение количества деревьев при увеличении возраста. То же самое можно сказать и о доле сохраняющихся к определенному возрасту растений в лесных культурах – она закономерно уменьшается. Применительно к объекту исследования этот процесс лучше всего аппроксимируется логарифмическим уравнением вида:

$$Y = a \ln(X) + b,$$

где Y – доля сохранившихся растений, %; a , b – коэффициенты уравнения; X – возраст лесных культур, лет.

Графическое изображение уравнений по вариантам опыта с указанием величин коэффициентов a , b и коэффициента детерминации (R^2) приведено на рис. 3.



Опыт	a	b	R^2	Опыт	a	b	R^2
P0	-20,7	83,869	0,313	P6	-24,16	80,562	0,222
P2	-20,14	93,432	0,349	PX	-14,25	85,921	0,204
P4	-16,86	92,101	0,314	M6	-18,09	56,069	0,186

Рис. 3. Динамика сохранности растений в лесных культурах сосны крымской

Fig. 3. Dynamics of plant safety of Crimean pine forest cultures

Высокие приживаемость и сохранность растений, низкий диапазон их варьирования, минимальный отпад растений, наблюдаемые в вариантах посадки с заглублением корневой шейки сеянцев на 2–4 см, а также близкие значения коэффициентов уравнений регрессии и максимальные коэффициенты детерминации позволяют считать заглубление корневой шейки растений *необходимым* аспектом создания лесных культур сосны крымской, а указанную величину – *оптимальной*. Во-первых, при нахождении стволика в почве ликвидируется диспропорция между массой надземной и подземной частей растения и тем самым обеспечивается его физическая устойчивость. Во-вторых, полностью находящийся на поверхности почвы фотосинтезирующий аппарат способствует быстрой адаптации растения к новым экологическим условиям и нормальному осуществлению физиологических процессов.

Близкие к этим вариантам показатели сохранности растений и динамики отпада выявлены и при посадке с заглублением стволика до начала охвоенной части. Однако высокая вариация признака, особенно на 4-й год роста, и минимальный среди вариантов ручной посадки коэффициент детерминации указывают на увеличение вероятности гибели растений вследствие засыпания слоем песка, больше всего при проведении последующих механизированных агротехнических уходов. Отрицательные последствия этого явления известны [11, 12, 15, 17, 18]. Поскольку при создании лесных культур механизированным способом невозможно с высокой точностью обеспечить посадку сеянцев с величиной заглубления корневой шейки, признанной оптимальной (2–4 см), считаем применимым к условиям указанного способа создания лесных культур вариант посадки «до начала охвоенной части сеянца».

Результатом лесовосстановления является отнесение площади молодняков к лесопокрытым землям (приказ Минприроды России № 1014). Нормированными для каждой главной древесной породы индикаторами являются возраст, количество деревьев и высота. То есть оценка соответствия созданного насаждения нормативным требованиям осуществляется не по относительным показателям эффективности (приживаемость, сохранность растений), а по абсолютной величине (густота). Для лесных культур сосны крымской, высаживаемых в лесном районе степей европейской части России, в возрасте 9 лет должно произрастать не менее 1800 растений на 1 га площади (приказ Минприроды России № 1014).

Аналитический расчет, выполненный на основе выявленных закономерностей сохранности растений (рис. 3) и с учетом их исходной густоты (4760 и 4166 шт./га – при ручной и механизированной посадке соответственно), показал, что нормативных параметров достигнутого насаждения, созданные вручную, и при обязательном соблюдении условия заглубления корневой шейки при посадке растений. Его минимальная величина – 2 см, максимальная – до начала охвоенной части сеянца, т. е. 4–5 см (табл. 4).

Применение правил посадки растений, разработанных для сосны обыкновенной, при создании лесных культур сосны крымской механизированным способом приводит к необходимости увеличения исходной густоты лесных культур. С учетом установленной тенденции изменения сохранности растений (рис. 3), исходная густота лесных культур должна быть не менее 11 тыс. шт./га.

Таблица 4

**Изменение густоты лесных культур сосны крымской при разных вариантах
заглубления корневой шейки растений**
**Changes in the density of Crimean pine forest cultures with different depth of the plant
collar**

Возраст лесных культур, лет	Густота растений, тыс. шт./га, по вариантам опыта					
	P0	P2	P4	P6	PX	M6
1	3,99	4,45	4,39	3,84	4,09	2,34
2	3,32	3,79	3,83	3,04	3,62	1,81
3	2,93	3,39	3,50	2,57	3,35	1,51
4	2,65	3,12	3,27	2,24	3,15	1,29
5	2,43	2,90	3,10	1,99	3,00	1,13
6	2,25	2,73	2,95	1,78	2,88	0,99
7	2,10	2,58	2,82	1,60	2,77	0,87
8	1,97	2,46	2,71	1,44	2,68	0,77
9	1,86	2,34	2,62	1,31	2,60	0,68

Примечание: Для возраста лесных культур 1–4 года приведены выровненные значения густоты; для возраста 5–9 лет – прогнозируемый показатель. Полужирным шрифтом выделены варианты опыта, в которых выровненная и прогнозируемая густота растений в лесных культурах не соответствуют нормативным данным (приказ Минприроды России № 1014).

Принимая во внимание положительный эффект, полученный в результате использования иных по сравнению с правилами для сосны обыкновенной правил посадки растений, считаем целесообразным их использование и при механизированном способе создания лесных культур. Аналитические расчеты показывают, что в случае осуществления механизированной посадки растений с заглублением корневой шейки на установленную оптимальную величину для обеспечения в будущем нормативной густоты созданного насаждения потребуется вдвое меньшее количество посадочного материала по сравнению со случаем несоблюдения требований к величине заглубления.

Таким образом, необходимым элементом технологии создания лесных культур сосны крымской на песках и песчаных почвах степной зоны должны быть специфические правила посадки растений, соответствующие биолого-экологическим особенностям породы и условиям выращивания.

Заключение

Выполненное исследование подтвердило авторскую гипотезу о неприемлемости использования при создании лесных культур сосны крымской некоторых элементов технологических операций, разработанных для сосны обыкновенной, и необходимости аутентификации правил посадки семян на почвах легкого гранулометрического состава.

Практика «глубокой посадки» (корневая шейка размещена ниже уровня поверхности почвы на 6 см и более) имеет отрицательные последствия. Сохранность растений в лесных культурах на 4-й год и при механизированном, и при ручном способе создания минимальна (32,7–51,8 %), вариация показате-

ля максимальна (41,5–67,9 %), прогнозируемая густота в 9-летнем возрасте не достигает нормативных показателей. Отсутствие заглубления корневой шейки также отрицательно сказывается на состоянии лесных культур. Сохранность растений на 4-й год составляет 58,8 % при неравномерном размещении по площади (34,0 %). Достижение нормативной густоты возможно только в случае увеличения ее исходного показателя минимум на 1 тыс. шт.

Среди причин гибели культивируемых растений выделим следующие:

- 1) посадка без заглубления корневой шейки и, как следствие, подмерзание обнаженных корней в зимний период и усыхание летом;
- 2) массовое засыпание песком до начала ростовых процессов надземной части при глубокой посадке (на 6 см и более).

Следует учесть, что при отнесении молодняков к лесопокрытым землям руководствуются прежде всего количеством деревьев главных пород. Достижение нормативной густоты лесных культур возможно при осуществлении посадки растений с заглублением корневой шейки на 2–4 см. Эта величина является оптимальной. Для механизированной посадки возможен ее адаптированный вариант – до начала охвоенной части сеянца.

Результаты исследований, проведенных на опытных объектах Ростовской области, и рекомендуемые на их основе правила посадки растений при создании лесных культур сосны крымской могут быть использованы и в других лесничествах степной зоны с аналогичными лесорастительными условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 6-е изд., стер., печ. по 5-му изд. 1985 г. М.: Альянс, 2011. 350 с. Dospekhov B.A. *Field Experience Methodology (with the Basics of Statistical Processing of Research Results): A Textbook for University Students on Agronomic Specialties. 6th edition.* Moscow, AlyanS Publ., 2011. 350 p. (In Russ.).
2. Зюзь Н.С. Культуры сосны на песках Юго-Востока. М.: Агропромиздат, 1990. 155 с. Zyuz N.S. *Pine Crops on the Sand Soils of the South-East.* Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 155 p. (In Russ.).
3. Кравченко В.И., Мельников А.И. Новое в освоении бугристых песков // Передовой опыт по технологии и комплексной механизации лесоразведения в Ростовской области. Ростов-на-Дону, 1974. С. 51–63. Kravchenko V.I., Melnikov A.I. Update in the Development of Hilly Sands. *Peredovoy opyt po tekhnologii i kompleksnoy mekhanizatsii lesorazvedeniya v Rostovskoy oblasti.* Rostov-on-Don, 1974. pp. 51–63. (In Russ.).
4. Манаенков А.С., Костин М.В. Опыт научных исследований по повышению эффективности лесоразведения в южных степях России // Лесохоз. информ. 2017. № 3. С. 92–102. Manaenkov A.S., Kostin M.V. Increase in Efficiency of Afforestation in the Southern Steppes of the Country. *Lesohozyaystvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2017, no. 3, pp. 92–102. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2017.3.08>
5. Манаенков А.С., Сурхаев И.Г. Эколого-мелиоративное влияние культур сосны на пастбища Терско-Кумского междуречья // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 1(37). С. 42–46.

Manaenkov A.S., Surkhaev I.G. Ecological and Meliorative Impact of Pine Crops on Grasslands of Tersko-Kumskoe Interfluve. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*, 2015, no. 1(37), pp. 42–46. (In Russ.).

6. Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области (минприроды РО): офиц. сайт. Режим доступа: <https://www.donland.ru/authority/8/> (дата обращения: 23.06.20).

Ministry of Natural Resources and Ecology of the Rostov Region. Online source. (In Russ.).

7. Пентелькина Н.В., Пентелькина Ю.С. Стимулирующее действие циркона на рост сеянцев хвойных интродуцентов // Лесн. вестн. 2002. № 2. С. 24–29.

Pentelkina N.V., Pentelkina Yu.S. Stimulating Effect of Zircon on the Growth of Seedlings of Coniferous Introducers. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2002, no. 2, pp. 24–29. (In Russ.).

8. Проказин Н.Е., Лобанова Е.Н., Пентелькина Н.В., Казаков В.И., Иванюшева Г.И., Сахнов В.В., Чукарина А.В., Багаев С.С. Влияние биостимуляторов и микроудобрений на рост сеянцев хвойных пород // Лесохоз. информ. 2013. № 2. С. 9–15.

Prokazin N.E., Lobanova E.N., Pentelkina N.V., Kazakov V.I., Ivanjusheva G.I., Sakanov V.V., Chukarina A.V., Bagaev S.S. Biostimulator and Microfertilizer Impacts on Coniferous Seedlings Growth. *Lesohozyaystvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2013, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.).

9. Родин С.А., Проказин Н.Е., Казаков В.И., Ерусалимский В.И., Миронов О.В., Багаев С.С., Краснобаева С.Ю., Чеплянский И.Я., Харлов И.Ю. Рекомендации по восстановлению искусственным и комбинированным способами хвойных и твердолиственных молодняков на землях лесного фонда (с базовыми технологическими картами на выполнение работ). Пушкино: ВНИИЛМ, 2015. 80 с.

Rodin S.A., Prokazin N.E., Kazakov V.I., Erusalimskiy V.I., Mironov O.V., Bagayev S.S., Krasnobayeva S.Yu., Cheplyanskiy I.Ya., Kharlov I.Yu. *Recommendations on the Restoration by Artificial and Combined Methods of Coniferous and Hard-Leaved Young Stocks on the Lands of the Forest Fund (with Basic Technological Maps for the Performance of Work)*. Pushkino, VNIILM Publ., 2015. 80 p. (In Russ.).

10. Сурхаев И.Г. Лесомелиорация песков Терско-Кумского междуречья культурами сосны: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Волгоград, 2015. 22 с.

Surkhaev I.G. *Forest Reclamation of Sands of the Tersko-Kum Interfluve with Pine Crops*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Volgograd, 2015. 22 p. (In Russ.).

11. Турчина Т.А. Технологические аспекты эффективности искусственного лесовосстановления на песках Среднего Дона // Агроекология, мелиорация и защитное лесоразведение: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 18–20 окт. 2018 г. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. С. 204–208.

Turchina T.A. Technological Aspects of the Effectiveness of Artificial Reforestation on the Sands of the Middle Don. *Agroecology, Reclamation and Protective Afforestation: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference, Volgograd, 18–20 October 2018*. Volgograd, FSC of Agroecology of RAS Publ., 2018, pp. 204–208. (In Russ.).

12. Турчина Т.А. Лесовосстановление на песках юго-востока России: современные проблемы и вызовы // Лесохоз. информ. 2019. № 3. С. 167–179.

Turchina T.A. Reforestation in the Sands of South-Eastern Russia: Modern Problems and Challenges. *Lesohozyaystvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2019, no. 3, pp. 167–179. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.24419/LHL.2304-3083.2019.3.14>

13. Турчина Т.А., Банникова О.А. Приживаемость лесных культур сосны крымской на бугристых песках Среднего Дона при использовании биологически активных веществ // Тр. СПбНИИЛХ. 2019. № 2. С. 40–58.

Turchina T.A., Bannikova O.A. Survival of Crimean Pine Forest Cultures on Central Don Hilly Sands When Using Biologically Active Agents. *Trudy of SPbNILH*, 2019, no. 2, pp. 40–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2019.2.40>

14. Avanoğlu B., Ayan S., Demircioğlu N., Sivacioğlu A. Kastamonu-Taşköprü Orman Fidanlığı'nda Üretilen Yaşlı Anadolu Karaçamı (*Pinus nigra* Arnold. subsp. *Pallasiana* (Lamb.) Holmboe.) Fidanlarının Tse Normlarına Göre Değerlendirilmesi. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2005, no. 2, pp. 73–83. (In Turkish).

15. Bessonova V., Grytsay Z. Content of Plastid Pigments in the Needles of *Pinus pallasiana* D. Don in Different Forest Growth Conditions of Anti-Erosion Planting. *Ekologia*, 2018, vol. 37, no. 4, pp. 338–344. <https://doi.org/10.2478/eko-2018-0025>

16. Çalışkan S., Boydak M. Afforestation of Arid and Semiarid Ecosystems in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2017, no. 41, pp. 317–330. <https://doi.org/10.3906/tar-1702-39>

17. Deligöz A., Bayar E., Genç M., Karatepe Y., Kırdar E., Cankara F.G. Seasonal and Needle Age-Related Variations in the Biochemical Characteristics of *Pinus nigra* Subsp. *Pallasiana* (Lamb.) Holmboe. *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64, no. 9, pp. 379–386. <https://doi.org/10.17221/66/2018-JFS>

18. Deligöz A., Cankara F.G. Differences in Physiological and Biochemical Responses to Summer Drought of *Pinus nigra* Subsp. *Pallasiana* and *Pinus brutia* in a Natural Mixed Stand. *Journal of Forestry Research*, 2020, vol. 31, no. 5, pp. 1479–1487. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-00876-8>

19. Eken O., Oner N. An Assessment of the Important Morphological Properties of Anatolian Black Pine Seedlings in Semiarid Forest Nursery. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 4158–4162. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/318393622> (accessed 23.06.20)

20. Korshikov I.I., Ducci F., Terliga N.S., Bychkov S.A., Gorlova E.M. Allozyme Variation of *Pinus pallasiana* D. Don in Natural Crimean Populations and in Plantations in Technogenously-Polluted Areas of the Ukraine Steppes. *Annals of Forest Science*, 2004, vol. 61, no. 5, pp. 389–396. <https://doi.org/10.1051/forest:2004032>

21. Öner N., Eren F. The Comparisons Between Root Collar Diameter and Height Growth of Black Pine (*Pinus nigra* Arnold.) and Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings in Bolu Forest Nursery. *Journal of Applied Biological Sciences*, 2008, no. 2(1), pp. 7–12. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/312173177> (accessed 23.06.20)

22. Varelides C., Brofas G., Varelides Y. Provenance Variation in *Pinus nigra* at Three Sites in Northern Greece. *Annals of Forest Science*, 2001, vol. 58, no. 8, pp. 893–900. <https://doi.org/10.1051/forest:2001103>

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*232.31.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-93-104

Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

В.Ю. Острошенко^{1✉}, канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAI-8395-2020](https://orcid.org/0000-0002-1970-9293),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9293>

Л.Ю. Острошенко², канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [CAH-1621-2022](https://orcid.org/0000-0002-5379-556X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-556X>

¹ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, просп. 100-летия Владивостоку, д. 159, г. Владивосток, Россия, 690022; OstroshenkoV@mail.ru[✉]

²Приморский государственный аграрно-технологический университет, просп. Блюхера, д. 44, г. Уссурийск, Россия, 692510; OstroshenkoV@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.21 / Одобрена после рецензирования 23.07.21 / Принята к печати 02.08.21

Аннотация. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является перспективным интродуцентом, который может быть использован для восстановления лесных насаждений в южной части Приморского края. Данная древесная порода имеет водорегулирующее и горноукрепительное значение. Широко применяется в народном хозяйстве. Однако рубка леса приводит к сокращению площади ее произрастания. Один из способов ускоренного восстановления сосны обыкновенной – использование стимуляторов роста. Цель настоящей работы – исследование воздействия препаратов натурального (Циркон, Экопин, Рибав-Экстра), а также синтетического (Крезацин, Эпин-Экстра) происхождения на грунтовую всхожесть семян и биометрические показатели 1–2-летних сеянцев сосны обыкновенной: высоту, диаметр корневой шейки, длину мочки корня и биомассу. Перед посевом семена в течение 1 ч. замачивали в растворе KMnO_4 (0,5 %), а затем в растворах стимуляторов роста, концентрация которых составляла $1 \cdot 4 \cdot 10^{-3}$ мл/л, в течение 20 ч. В качестве контроля служили семена, не обработанные стимуляторами. На 15-й день определяли грунтовую всхожесть. В рамках того же опыта выявляли эффективность стимуляторов при корневой подкормке 1–2-летних сеянцев. Концентрации растворов – 0,2 и 0,1 мл/л воды. Для сравнения использовали сеянцы, подкормка которых не осуществлялась. Установлено, что значительный эффект на грунтовую всхожесть семян оказали препараты Крезацин, Рибав-Экстра и Экопин – всхожесть 92,7–94,0 %. Превышение по отношению к контролю – 5,7–7,2 %. При выращивании сеянцев сосны обыкновенной наиболее эффективны стимуляторы роста Крезацин, Рибав-Экстра, Циркон и Экопин. В 1-й год роста отмечено увеличение показателей высоты сеянцев на 20,3–43,5 %, диаметра у корневой шейки – на 22,2–38,9 %, длины мочки корня – на 23,5–52,9 %. Во 2-й год роста эти показатели превышали контроль на 18,4–75,5; 2,9–11,8 и 15,0–36,1 % соответственно. Биомасса 2-летних сеянцев в случае применения указанных стимуляторов увеличилась в сравнении с контрольной группой на 63,7–185,2 %. Концентрация раствора 0,1 мл/л более эффективна. Двулетние сеянцы сосны обыкновенной, выращенные с применением корневой подкормки растворами с указанными выше препаратами, по биометрическим показателям соответствуют требованиям Правил лесовосстановления 2020 г., существенно превышая обозначенные там значения. Данные сеянцы можно использовать для закладки лесных массивов и в озеленении районов населенных пунктов.

© Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю., 2023

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

Ключевые слова: стимуляторы, корневая подкормка, Крезацин, Рибав-Экстра, Циркон, Экопин, Эпин-Экстра, сосна обыкновенная, всхожесть, сеянцы, уход за сеянцами, предпосевная обработка семян

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 121031000120-9 «Изучение и мониторинг наземных биологических ресурсов юга Дальнего Востока России».

Для цитирования: Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 93–104. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-93-104>

Original article

Influence of Growth Stimulants on Seed Germination and Seedlings Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.)

Valentina Yu. Ostroshenko^{1✉}, Candidate of Agriculture, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAI-8395-2020](https://orcid.org/0000-0002-1970-9293), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9293>

Lyudmila Yu. Ostroshenko², Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [CAH-1621-2022](https://orcid.org/0000-0002-5379-556X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-556X>

¹Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, pros. 100-year of Vladivostok, 159, Vladivostok, 690022, Russian Federation; OstroshenkoV@mail.ru[✉]

²The Primorsky State Agricultural and Technological University, pros. Blyuhera, 44, Ussurisk, 692510, Russian Federation; OstroshenkoV@mail.ru

Received on April 06, 2021 / Approved after reviewing on July 23, 2021 / Accepted on August 02, 2021

Abstract. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is a potential introduced plant that can be used for reforestation in the southern part of Primorsky Krai. This plant is valuable for water regulation and mountain strengthening. It is widely used in the national economy. However, the growing area of the stands reduces with logging. It is possible to speed up the regeneration process by applying growth stimulants. The purpose of this study is to investigate the impact of natural (Zircon, Ekopin, Ribav-Extra) and synthetic (Krezatzin, Epin-Extra) growth stimulants on seed germination and biometric parameters of annual and biennial Scots pine seedlings (height, root collar diameter, length of root lobes, and biomass). Before cultivation, the seeds were soaked for 1 hour in a solution of KMnO_4 (0.5 %) followed by 20 hours in growth stimulant solutions with concentrations $1.4 \cdot 10^{-3}$ ml/l. The control group was presented with seeds without stimulant treatment. The soil germination was controlled on day 15. It was also determined the effectiveness of the stimulants as root top dressing for annual and biennial seedlings. The concentrations of the solutions were 0.2 and 0.1 ml/l with water as a solvent. The reference group was seedlings without fertilization. Krezatzin, Ribav-Extra, and Ecopin had a significant impact on seed germination (92.7–94.0 %), exceeding the control group by 5.7–7.2 %. Krezatzin, Ribav-Extra, Zircon and Ecopin were most effective for Scots pine seedlings. In the first year of growth, seedling height increased by 20.3–43.5 %, root collar diameter by 22.2–38.9 %, root lobe length by 23.5–52.9 %. In the second year, these indicators exceeded the control group by 18.4–75.5, 2.9–11.8 and 15.0–36.1 %, respectively. The biomass of biennial seedlings increased by 63.7–185.2 % compared to the control group with the use of these stimulants. The solution concentration of 0.1 ml/l was more effective. The biennial



seedlings grown using the stimulants as root top dressing according to biometric indicators meet the requirements of the Reforestation Regulations 2020, significantly exceeding the values specified in them. These seedlings can be used for planting woodlands and landscaping in populated areas.

Keywords: stimulants, root dressing, Krezatsin, Ribav-Extra, Zircon, Ecopin, Epin-Extra, Scots pine, germination, seedlings, seedling care, seed pre-treatment

Acknowledgment: The research was carried out under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, theme No. 121031000120-9 «Study and Monitoring of Terrestrial Biological Resources of the South of the Russian Far East».

For citation: Ostroshenko V.Yu., Ostroshenko L.Yu. Influence of Growth Stimulants on Seed Germination and Seedlings Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 93–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-93-104>

Введение

Приморье – один из наиболее крупных дальневосточных регионов России. Вся территория края протянулась вдоль побережья Японского моря, что оказывает существенное влияние на климат и растительность. Последний проведенный учет лесного фонда показал, что общая площадь лесов Приморского края превышает 10 000 га и более половины этой площади приходится на хвойные древесные породы (не менее 5300 тыс. га) [17]. На землях фонда активно выращиваются представители рода *Pinus*: сосна, пихта, ель и лиственница.

Дальневосточные леса преимущественно произрастают в гористой местности. В этих условиях (горный рельеф, каменистая почва) при наличии легкораннимой и сложновосстанавливающейся экосистемы именно сосна обыкновенная заслуженно считается одной из самых лучших лесных пород, способной закрепить овраги, песчаные склоны, полесозащитные и придорожные полосы. В то же время древесина сосны обыкновенной активно применяется для различных народно-хозяйственных нужд, в связи с чем пользуется спросом и активно вырубается. Ученые пришли к выводу, что биологические и экологические особенности сосны обыкновенной обуславливают необходимость ее активной защиты и часто проведения мероприятий, целью которых является воспроизводство вида. Один семенной год в сосняках региона может приходиться на 3–4 неурожайных сезона [10] и у семян при таком длительном хранении снижаются энергия прорастания и всхожесть, поэтому требуется их обработка растворами стимуляторов роста.

Стимуляторы роста – это вещества, являющиеся качественными ингибиторами или активаторами процессов роста и развития любого растения. Они могут быть натуральными (природного происхождения, например Циркон), либо искусственно синтезированными (например Крезацин). Первые исследования стимуляторов роста, применяемых в сельском хозяйстве, продемонстрировали высокую эффективность их использования. Семена, предварительно обработанные препаратами, отличаются хорошими показателями лабораторной и грунтовой всхожести. Рост сеянцев, для подкормки которых применялись стимуляторы, становится более активным. Кроме того, повышается их сохранность [2, 3, 5–8, 11–19].

Наиболее распространенные в сфере сельского хозяйства стимуляторы перечислены ниже.

Крезацин – синтетический иммуностимулятор, качественно характеризуется широким спектром биологической активности, легко растворяется в воде или спирте, совершенно не растворяется в эфире [9].

Рибав-Экстра – продукт, вырабатываемый микоризными грибами, выделенными из корней женьшеня посредством применения биотехнологий, имеет в своем составе уникальный натуральный комплекс (аминокислоты + фитогормоны + витамины), даже минимальные дозы препарата способны активизировать все процессы жизнедеятельности у растений. Действующим веществом является 0,00125 г/л L-аланина и 0,00196 г/л L-глутаминовой кислоты [9].

Циркон – стимулятор, который получают посредством обработки вытяжки из цветка Эхинацеи пурпурной, имеет в составе комплексные эфиры на основе растворяемых в спирте гидроксикоричных кислот (кофейной, цикориевой, хлорогеновой), определяющих глубинное влияние препарата на метаболизм клетки и участвующих в определении гормонального статуса и энзиматического профиля [4].

Экопин – препарат, состоящий из 6,2 г/кг поли-бета-гидроксимасляной кислоты в сочетании с терпеновыми кислотами и набором элементов питания. Представляет собой продукт биосинтеза почвенных бактерий с начальным набором питательных элементов. Обладает антистрессовым эффектом [9].

Эпин-Экстра – продукт аналогичный природному фитогормону. Его действующее вещество эпибрассинолид активизирует биологические процессы в растениях, эффективно сглаживая последствия болезней, старости или стрессовых ситуаций [9].

Названные препараты обладают малой токсичностью и полностью безопасны для человека, различных теплокровных животных, некоторых насекомых и рыб. Лишены мутагенного воздействия, способствуют снижению в растениях количества солей и тяжелых металлов, повышают сопротивляемость растений заморозкам, засухе или избыточному увлажнению. Полностью растворяются в воде без осадка, не накапливаются в почве, не загрязняют поверхностных или грунтовых вод, нефитотоксичны. Абсолютно безвредны с экологической точки зрения. Рекомендованы для предпосевной, корневой и внекорневой подкормки. Все препараты занесены в список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории РФ [9].

Цель исследования – изучение воздействия корневой подкормки перечисленными стимуляторами на грунтовую всхожесть семян, рост сеянцев сосны обыкновенной и их биометрические показатели.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются 1–2-летние сеянцы сосны обыкновенной, выращенные в питомнике Горнотаежной станции им. В.Л. Комарова (филиал ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН), находящемся в с. Горно-Таежное, в 25 км к юго-востоку от г. Уссурийска. Территория характеризуется как горно-лесной бурозем с подзолистым слоем грунта. Рельеф слабоволнистый с небольшим уклоном. Шишки сосны обыкновенной собраны осенью в лесном массиве, вблизи территории станции. Семена извлечены из собранных шишек, очищены от крылаток, а весной посеяны на грядку в питомнике. Площадь одного варианта составила 3,6 м².

Подготовка к посеву заключалась в следующем. Почву вскапывали вручную и обустроивали грядки для посева семян. Высота гряд – 20 см от уровня почвы. Расположение посевных строк – поперечное. Расстояние между центрами строк – 20 см, между вариантами опытов – 40 см. Семена в течение 1 ч. замачивали в растворе KMnO_4 (0,5 %), а затем в течение 20 ч. их одновременно выдерживали в растворах 5 стимуляторов роста: Крезацин, Рибав-Экстра, Циркон, Экопин и Эпин-Экстра. Концентрация растворов составила $1 \cdot 4 \cdot 10^{-3}$ мл/л. В качестве контроля использовали семена, не обработанные стимуляторами роста.

Семена дважды высевали в 3-кратной повторности. В каждой повторности (посевной строке) – по 100 шт. семян. В одном варианте – 600 шт. Всего, с учетом проведения дальнейшей корневой подкормки растворами препаратов в концентрации 0,2 и 0,1 мл/л, высеяли 3300 шт. семян: по 600 шт. семян, обработанных каждым стимулятором, и 300 шт. семян контроля. Глубина заделки семян составила 1,5 см. На 15-й день определяли грунтовую всхожесть семян.

В рамках тех же опытов выявляли эффективность стимуляторов роста при корневой подкормке сеянцев по всем вариантам, за исключением контроля. С момента появления всходов и начала их роста, а затем через 2 недели (в июне) и на 2-й год роста один раз, по вечерам, если не прогнозировали дождь, проводили подкормку подготовленными растворами препаратов концентрациями 0,2 и 0,1 мл/л воды (по 300 шт. сеянцев на каждую концентрацию раствора).

На протяжении 2 лет за сеянцами проводили постоянный уход. Тщательно пропалывали сорняки и разрыхляли почву между посевными строками: в 1-й год роста эта процедура осуществлялась дважды, во 2-й год – один раз. Все сеянцы регулярно поливали. После вегетации от каждого из вариантов отбирали случайным образом по 25 сеянцев. Линейкой с точностью до 0,1 мм у них измеряли высоту стволиков. Затем рассчитывали средние величины.

По завершении вегетационной стадии от каждого из вариантов исследования отбирали по 3 сеянца средней высоты. Их корни тщательно отмывали от субстрата, протирали сухой хлопчатобумажной тканью и подсушивали в затененном помещении. После просушки линейкой измеряли длину мочки корня, а штангенциркулем с точностью до 0,1 мм – диаметр его шейки. Далее корневую часть сеянцев отделяли от надземной части (стволик, хвоя, боковые побеги ветвления), высушивали каждую из этих двух частей и взвешивали на весах ВЛКТ-500 с точностью до 0,01 г.

Статистический анализ показателей грунтовой всхожести семян и высоты сеянцев проведен в программе Microsoft Excel 2007. Итоги сравнивали по вариантам проведенного исследования и с контрольными показателями. Существенность различий определяли путем применения формулы расчета различий между двумя средними показателями и дисперсионного анализа [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Итоги метеонаблюдений на объекте исследований продемонстрировали, что погодные условия в период осуществления опытов были в пределах среднелетних показателей.

Предпосевная обработка семян сосны обыкновенной стимуляторами роста повысила их грунтовую всхожесть (табл. 1). Она находилась в пределах 91,0–94,0 %. Превышение по отношению к контролю – 3,8–7,2 %. Наиболее

положительный эффект оказали препараты Крезацин, Рибав-Экстра и Экопин. Отмечена существенность различий с контрольными показателями $t \geq 3$. При обработке семян стимулятором Эпин-Экстра наблюдался ингибирующий эффект: грунтовая всхожесть была ниже, чем в контроле на 5,7 %. Дисперсионным анализом была установлена достоверность полученных значений.

Таблица 1

Влияние стимуляторов роста концентрацией растворов $1 \cdot 10^{-3}$ мл/л на грунтовую всхожесть семян сосны обыкновенной
The influence of growth stimulants with solution concentrations of $1 \cdot 10^{-3}$ ml/l on soil germination of Scots pine seeds

Вариант опыта	Всхожесть, %		Существенность различий, t
	M±m	к контролю	
Контроль	87,7±1,5	–	–
Крезацин	94,0±0,6	+7,2	$3,9 \geq 3$
Рибав-Экстра	93,6±0,3	+6,7	$4,2 \geq 3$
Циркон	91,0±0,6	+3,8	$1,5 \leq 3$
Экопин	92,7±0,6	+5,7	$3,1 \geq 3$
Эпин-Экстра	82,7±0,3	-5,7	$-3,3 \leq 3$
	F _{стат} / F _{табл}		$12,6662 \geq 7,71$

Позитивный эффект корневой подкормки с применением препаратов отмечен уже в 1-й год выращивания (табл. 2).

Таблица 2

Влияние корневой подкормки стимуляторами на рост 1-летних сеянцев сосны обыкновенной
The influence of root dressing with stimulants on the growth of annual seedlings of Scots pine

Стимулятор роста – концентрация раствора, мл/л	Высота		Существенность различий, t	Диаметр шейки корня		Длина мочки корня	
	M±m, см	процент к контролю		мм	процент к контролю	см	процент к контролю
Контроль	6,9±0,2	–	–	1,8	–	6,8	–
Крезацин	8,7±0,2	+26,1	$6,4 \geq 3$	2,2	+22,2	9,8	+44,1
	0,1	9,5±0,4	+37,7	$5,8 \geq 3$	2,4	+33,3	10,1
Рибав-Экстра	8,5±0,4	+23,2	$3,6 \geq 3$	2,4	+33,3	8,4	+23,5
	0,1	9,8±0,2	+42,0	$10,4 \geq 3$	2,5	+38,9	9,7
Циркон	9,3±0,2	+34,8	$8,6 \geq 3$	2,4	+33,3	9,4	+38,2
	0,1	9,9±0,3	+43,5	$8,3 \geq 3$	2,5	+38,9	10,4
Экопин	8,3±0,1	+20,3	$6,4 \geq 3$	2,3	+27,8	8,6	+26,5
	0,1	9,2±0,2	+33,3	$8,2 \geq 3$	2,4	+33,3	10,3
Эпин-Экстра	7,6±0,2	+10,1	$2,5 \leq 3$	2,0	+11,1	8,1	+19,1
	0,1	8,0±0,5	+15,9	$2,0 \leq 3$	2,1	+16,7	9,2

На прирост 1-летних сеянцев по высоте наибольшее влияние оказала их 2-кратная подкормка растворами стимуляторов роста Крезацин, Циркон, Рибав-Экстра и Экопин. Так, при концентрации растворов 0,2 мл/л превышение по отношению к контролю составило 20,3–34,8 %, при концентрации 0,1 мл/л – 33,3–43,5 %, средняя высота находилась в пределах 8,3–9,3 см. Отмечена существенная разница с контролем: $t \geq 3$. Согласно данным дисперсионного анализа влияние стимуляторов на увеличение высоты достоверно на 5%-м уровне значимости (табл. 3). Эпин-Экстра оказал меньший эффект: было выявлено превышение по отношению к контрольному показателю лишь на 16 %.

Таблица 3

**Дисперсионный анализ влияния стимуляторов роста на высоту
1-летних сеянцев сосны обыкновенной**
**Dispersion analysis of the effect of growth stimulants on the height
of annual seedlings of Scots pine**

Сравниваемые совокупности	df	S	MS	F _{стат}	F _{табл}
Между группами	10	219,6360	21,9636	13,0415	4,28
Внутри групп	276	464,8205	1,6841	–	–
Общее	286	684,4565	–	–	–

Увеличение прироста диаметра шейки корня было вызвано применением всех стимуляторов. Так, при использовании стимулятора Крезацин превышение контрольной отметки в зависимости от концентрации находилось в пределах 22,2–33,3 %; при использовании стимуляторов Циркон, Рибав-Экстра – 33,3–38,9 %, Экопин – 27,8–33,3 %. При корневой подкормке растворами с препаратом Эпин-Экстра превышение составило 11,1–16,7 %. Причем фактический диаметр был практически одинаковым при концентрациях 0,2 и 0,1 мл/л – соответственно до 2,4 и 2,5 мм.

Наибольшая длина мочки корня отмечена при применении препаратов Рибав-Экстра, Крезацин, Экопин и Циркон. Средняя величина составила 8,4–9,8 см для концентрации раствора 0,2 мл/л (показатель превысил контроль на 19,1–44,1 %) и 9,7–10,4 см для концентрации 0,1 мл/л (превышение по отношению к контролю – 35,3–52,9 %). При применении препарата Эпин-Экстра длина мочки корня составила 8,1–9,2 см.

Существенное развитие 1-летних сеянцев, вызванное корневой подкормкой стимуляторами роста, характеризовало последующий рост 2-летних сеянцев (табл. 4).

Использование раствора концентрацией 0,1 мл/л способствовало более существенному росту сеянцев по сравнению с применением раствора концентрацией 0,2 мл/л. Так, при концентрации 0,2 мл/л сеянцы превысили контроль по высоте на 17,0–31,3 %, высота составила 17,2–19,3 см. При концентрации раствора 0,1 мл/л – на 19,0–75,5 %, при средней высоте 17,5–25,8 см. Различия с контролем достоверны: $t \geq 3$. Стимуляторы Крезацин, Рибав-Экстра, Циркон и Экопин наиболее эффективны. С помощью дисперсионного анализа доказана достоверность влияния стимуляторов на высоту сеянцев (табл. 5).

Таблица 4

**Влияние корневой подкормки стимуляторами на рост
2-летних сеянцев сосны обыкновенной**
**The influence of root top dressing with stimulants on the growth
of biennial seedlings of Scots pine**

Стимулятор роста – концентрация раствора, мл/л	Высота		Суще- ствен- ность различий, t	Диаметр шейки корня		Длина мочки корня	
	M±m, см	процент к контролю		мм	процент к контролю	см	процент к контролю
Контроль	14,7±0,2	–	–	3,4	–	13,3	–
Крезацин 0,2	19,3±0,3	+31,3	12,8 ≥ 3	3,5	+2,9	15,8	+18,8
0,1	25,8±0,5	+75,5	20,6 ≥ 3	3,8	+11,8	16,9	+27,1
Рибав-Экстра 0,2	18,1±0,4	+23,1	7,6 ≥ 3	3,5	+2,9	16,9	+27,1
0,1	21,2±0,5	+44,2	12,0 ≥ 3	3,7	+8,8	18,1	+36,1
Циркон 0,2	19,2±0,6	+30,6	7,1 ≥ 3	3,6	+5,9	17,1	+28,6
0,1	24,3±0,5	+65,3	17,8 ≥ 3	3,7	+8,8	17,5	+31,6
Экопин 0,2	17,4±0,3	+18,4	7,5 ≥ 3	3,5	+2,9	15,3	+15,0
0,1	20,5±0,8	+39,5	7,1 ≥ 3	3,6	+5,9	17,7	+33,1
Эпин-Экстра 0,2	17,2±0,3	+17,0	6,9 ≥ 3	3,5	+2,9	14,8	+11,3
0,1	17,5±0,3	+19,0	7,8 ≥ 3	3,6	+5,9	16,1	+21,1

Таблица 5

**Дисперсионный анализ влияния стимуляторов роста на высоту
2-летних сеянцев сосны обыкновенной**
**Dispersion analysis of the effect of growth stimulants on the height
of biennial seedlings of Scots pine**

Сравниваемые совокупности	df	S	MS	F _{стат}	F _{табл}
Между группами	10	2743,4877	274,3488	19,5246	4,28
Внутри групп	276	3878,2036	14,0515	–	–
Общее	286	6621,6913	–	–	–

На увеличение диаметра корневой шейки положительно повлияла подкормка всеми стимуляторами роста при концентрации раствора 0,1 мл/л (превышение контрольной отметки на 5,9–11,8 %), диаметр в этом случае составил 3,6–3,8 мм. Менее эффективна концентрация 0,2 мл/л: превышение по сравнению с контролем находилось в пределах 2,9–5,9 %, средние показатели составили 3,5–3,6 мм.

Наиболее позитивный эффект на прирост длины мочки корня был оказан стимуляторами роста Рибав-Экстра и Циркон (при обеих концентрациях растворов), а также Экопин (при концентрации 0,1 мл/л). Превышение по отношению к контрольным показателям лежит в пределах 27,1–36,1 %, средние показатели составили 16,9–18,1 см.

Примененные в опытах стимуляторы роста оказали положительное воздействие на увеличение биомассы сеянцев. Так, при их корневой подкормке стимулятором Крезацин превышение по сравнению с контрольными величинами составило 108,9–136,3 %, препаратами Рибав-Экстра, Циркон, Экопин – 124,4–162,2; 63,7–108,1 и 131,9–185,2 % соответственно. Эпин-Экстра оказался менее эффективен, показатели превысили контроль лишь на 30,4–46,7 % (табл. 6).

Таблица 6

Воздействие растворов стимуляторов роста разной концентрации на биомассу 2-летних сеянцев сосны обыкновенной
Impact of growth stimulant solutions of various concentrations on biomass of biennial seedlings of Scots pine

Стимулятор	Масса сеянца в воздушно-сухом состоянии, г					
	стволик	боковые побеги ветвления	хвоя	итого надземная часть	корневая система	общая масса
Контроль	0,41	0,01	0,52	0,94	0,41	1,35
<i>Концентрация раствора 0,2 мл/л</i>						
Крезацин	0,82	0,02	0,78	1,62	1,20	2,82
	+100,0	+100,0	+50,0	+72,3	+192,7	+108,9
Рибав-Экстра	0,91	0,02	0,81	1,74	1,29	3,03
	+122,2	+100,0	+55,8	+85,1	+214,6	+124,4
Циркон	0,73	–	0,71	1,44	0,77	2,21
	+78,0	–	+36,5	+53,2	+87,8	+63,7
Экопин	0,96	0,02	0,87	1,85	1,28	3,13
	+134,1	+100,0	+67,3	+96,8	212,2	+131,9
Эпин-Экстра	0,61	–	0,63	1,24	0,52	1,76
	+48,8	–	+21,2	+31,9	+26,8	+30,4
<i>Концентрация раствора 0,1 мл/л</i>						
Крезацин	1,19	0,02	1,39	2,58	0,61	3,19
	+190,2	+100,0	+167,3	+174,5	+48,8	+136,3
Рибав-Экстра	1,31	0,02	1,58	2,91	0,63	3,54
	+219,5	+100,0	+203,8	+209,6	+53,7	+162,2
Циркон	0,94	0,01	1,32	2,27	0,54	2,81
	+129,3	–	+153,8	+141,5	+31,7	+108,1
Экопин	1,42	0,02	1,72	3,16	0,69	3,85
	+246,3	+100,0	+230,8	+236,2	+68,3	+185,2
Эпин-Экстра	0,72	–	0,68	1,40	0,58	1,98
	+75,6	–	+30,8	+48,9	+41,5	+46,7

Примечание: В нижней ячейке приведен процент по отношению к контролю.

Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали эффективность стимуляторов роста Циркон, Экопин, Рибав-Экстра, Крезацин и Эпин-Экстра для выращивания сеянцев сосны обыкновенной при концентрации 0,1 мл/л, однако препарат Эпин-Экстра оказался менее эффективным по сравнению с другими препаратами. Отмечено повышение грунтовой всхожести, а также существенная активация роста сеянцев по большинству биометрических показателей. Двулетние сеянцы, выращиваемые с применением корневой подкормки указанными стимуляторами, не только соответствуют показателям, прописанным в действующих Правилах лесовосстановления (приказ Минприроды России от 04 декабря 2020 г. № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений»), но и превышают их по средней высоте и диаметру корневой шейки. Таким образом, выращенные с использованием корневой подкормки 2-летние сеянцы сосны обыкновенной могут служить в качестве посадочного материала при закладке лесных массивов и при озеленении населенных пунктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доев С.К. Математические методы в лесном хозяйстве. Уссурийск: ПГСХА, 2001. 124 с.
Doyev S.K. *Mathematical Methods in Forestry. A Study Guide*. Ussuriysk, PGSKhA Publ., 2001. 124 p. (In Russ.).
2. Кабанова С.А., Данченко М.А., Кочегаров И.С., Кабанов А.Н. Опыт интенсивного выращивания однолетних сеянцев сосны обыкновенной в Павлодарской области Республики Казахстан // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 104–117.
Kabanova S.A., Danchenko M.A., Kochegarov I.S., Kabanov A.N. The Experience of Intensive Cultivation of One-Year-Old Seedlings of *Pinus sylvestris* L. in Pavlodar Region of the Republic of Kazakhstan. *Lesnoy zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 6, pp. 104–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.104>
3. Кириенко М.А., Гончарова И.А. Влияние концентрации стимуляторов роста на грунтовую всхожесть семян и сохранность сеянцев главных лесобразующих видов Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2016. № 1. С. 39–45.
Kiriyenko M.A., Goncharova I.A. The Influence of Growth Stimulants at Different Concentrations on Ground Seed Germination and Survival of Seedlings of the Main Forest Forming Species of Central Siberia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 1, pp. 39–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20160104>
4. Малеванная Н.Н., Быховская Н.В. Циркон – новый фитопрепарат для сельского хозяйства, полученный на основе нетрадиционного растительного сырья // Химическое и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2001. № 5. С. 7.
Malevannaya N.N., Bykhovskaya N.V. Zircon – a New Phytopreparation for Agricultural Use Derived from an Unconventional Herbal Raw Material. *Khimicheskoye i komp'yuternoye modelirovaniye. Butlerovskiyee soobshcheniya*, 2001, no. 5, pp. 7. (In Russ.).
5. Остробородова Н.И., Уланова О.И. Влияние регуляторов роста на биологические свойства сосны обыкновенной // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 1(17). С. 33–37.

Ostrobodova N.I., Ulanova O.I. Influence of Growth Regulators on the Biological Properties of Scots Pine. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 2014, no. 1(17), pp. 33–37. (In Russ.).

6. *Пентелькин С.К.* Итоги изучения стимуляторов роста и полимеров в лесном хозяйстве за последние 20 лет // Лесохоз. информ. 2003. № 11. С. 34–53.

Pentelkin S.K. The Results of the Research on Growth Stimulants and Polymers in Forestry in the Last 20 Years. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 2003, no. 11, pp. 34–53. (In Russ.).

7. *Пентелькина Н.В., Острошенко Л.Ю.* Выращивание семян хвойных пород в условиях Севера и Дальнего Востока с использованием стимуляторов роста // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. Вып. 10. С. 125–129.

Pentelkina N.V., Ostroshenko L.Yu. The Cultivation of Coniferous Seedlings in the North and the Far East Using Growth Stimulants. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2005, vol. 10, pp. 125–129. (In Russ.).

8. *Пентелькина Ю.С.* Опыт-производственная проверка крезацина в лесных питомниках // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития. Брянск: БГИТА, 2003. Вып. 5. С. 130–132.

Pentelkina Yu.S. Experimental and Field Testing of Crezacin in Forest Nurseries. *Lesnoy kompleks: sostoyaniye i perspektivy razvitiya*. Bryansk, BGITA Publ., 2003, vol. 5, pp. 130–132. (In Russ.).

9. Справочник пестицидов 2023. Режим доступа: [https://www. agroxxi.ru/goshandbook](https://www.agroxxi.ru/goshandbook) (дата обращения: 26.05.23).

Pesticide Directory 2023. Website of agroXXI.ru: news portal for agribusiness professionals in the agriculture, farming, and machinery sectors. (In Russ.).

10. *Усенко Н.В.* Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока. Хабаровск: Кн. изд-во, 1969. 416 с.

Usenko N.V. *Trees, Shrubs and Lianas of the Far East*. Khabarovsk, Izdatel'stvo Kniga Publ., 1969. 416 p. (In Russ.).

11. *Устинова Т.С., Ченцов С.С.* Выращивание семян сосны обыкновенной с использованием стимулятора эпин-экстра // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2013. Вып. 37. С. 26–28.

Ustinova T.S., Chentsov S.S. Cultivation of Scots Pine Seedlings Using Epin-Extra Stimulant. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2013, vol. 37, pp. 26–28. (In Russ.).

12. *Чилимов А.И., Пентелькин С.К.* Проблемы использования стимуляторов роста в лесном хозяйстве // Лесн. хоз-во. 1995. № 6. С. 11–12.

Chilimov A.I., Pentelkin S.K. Problems of Using Growth Stimulants in Forestry. *Lesnoye khozyaystvo = Forestry*, 1995, no. 6, pp. 11–12. (In Russ.).

13. Brent A.C., Bert M.C. Gibberellic Acid Inhibitors Control Height Growth and Cone Production in *Abies fraseri*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32, no. 5, pp. 391–396. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1242771>

14. Chang E.H., Jung S.M., Hur Y.Y., Nam J.Ch., Choi I.M. Characteristics of the Fruit Quality and Volatile Compounds of «Cheongsoo» Grape by Treatment With Different Plant Growth Regulators. *Korean Journal Horticultural Science and Technology*, 2018, vol. 36, no. 3, pp. 326–336. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20180032>

15. Krawczynska M., Kolwzan B., Rybak J. The Influence of Biopreparation on Seed Germination and Growth. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2012, vol. 21, no. 6, pp. 1697–1702.

16. Kuneš I., Baláš M., Linda R., Gallo J. Effects of Brassinosteroid Application on Seed Germination of Norway Spruce, Scots Pine, Douglas Fir, and English Oak. *IForest: Biogeosciences and Forestry*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 121–127. <https://doi.org/10.3832/ifor1578-009>

17. Ostroshenko V., Ostroshenko L. Efficiency of the Application of Growth Stimulants Ribav-Extra and Zircon in the Germination of Manchurian Fir (*Abies holophylla* Maxim.) seeds. *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East: Proceedings of AFE-2021*. Springer Publ., 2022, vol. 353, pp. 637–647. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91402-8_71

18. Salaš, P., Sasková H., Mokričková J., Litschmann T. Evaluation of Different Types of Rooting Stimulators. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2013, vol. 60, no. 8, pp. 217–228. <https://doi.org/10.11118/actaun201260080217>

19. Shchukin R.A., Bogdanov O.E., Zavoloka I.P., Ryazanov G.S., Kruglov N.M. Biotechnological Basis for Application of Growth Regulators for Rooting of Green Cuttings of Trees and Shrubs in a Greenhouse with a Misting System. *BIO Web of Conferences*, 2020, vol. 23, art. no. 01009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202301009>

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 551.58+57.044

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-105-119

Воздействие климатических факторов на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на побережье Кандалакшского залива Белого моря

А.Е. Кухта¹✉, канд. биол. наук; ResearcherID: [A-9570-2016](https://orcid.org/0000-0002-3710-3578),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3710-3578>

О.В. Максимова^{1,2}, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAB-8632-2020](https://orcid.org/0000-0002-0569-8650),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0569-8650>

В.В. Кузнецова³, канд. геогр. наук; ResearcherID: [AAG-7392-2021](https://orcid.org/0000-0003-3155-7330),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3155-7330>

¹Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, ул. Глебовская, д. 20 б, Москва, Россия, 107258; anna_koukhata@mail.ru✉

²Университет МИСИС, просп. Ленинский, д. 4, Москва, Россия, 119049; o-maximova@yandex.ru

³Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, Россия, 119017; kuznetsova@igras.ru

Поступила в редакцию 11.04.21 / Одобрена после рецензирования 22.07.21 / Принята к печати 01.08.21

Аннотация. Цель данной работы – сравнительный анализ изменчивости линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) побережья Кандалакшского залива Белого моря в зависимости от условий произрастания, а также оценка отклика этого вида на воздействия температур и осадков текущего и предыдущего вегетационных сезонов. Используются стандартные способы измерений и анализа данных. В качестве показателя отклика древостоев на воздействия факторов среды обитания служила динамика приростов в высоту и по диаметру. Проведена статистическая оценка вариабельности приростов в зависимости от типа местообитания, а также оценка связи биометрических показателей древостоев с суммами осадков и средними температурами. Для рядов индексов линейных приростов выявлены значимые отличия между различными биотопами; для радиальных – не выявлены. Таким образом, по рядам радиальных приростов возможно проводить наблюдения за типичным поведением изменчивости деревьев вне зависимости от типа биотопа. Это дает основание к осуществлению долгосрочного ретроспективного анализа взаимоотношений древостоев и среды с использованием древесно-кольцевых хронологий без учета условий произрастания. Подтверждена роль осадков как лимитирующего фактора для радиальных и линейных приростов в ходе фенофазы роста междуузлий и развития ранней древесины. Лимитирующая роль температур обнаружена для радиальных приростов лишь на этапах формирования поздней древесины и накопления ресурсов для роста в следующем вегетационном сезоне. Выявлена высокая чувствительность к воздействиям климатических факторов линейных приростов, что обуславливает их бóльшую информативность в качестве критерия оценки состояния лесных экосистем для коротких (до 30 лет) периодов. Однако это, в свою очередь, диктует невозможность формирования многолетних рядов, как для радиальных приростов, что является существенным ограничением при

использовании данного метода. Сделано заключение о том, что выбор методов анализа по линейным или по радиальным приростам определяется целями планируемого исследования – мониторинга лесных экосистем в современных условиях изменения климата или долгосрочного палеоклиматического анализа.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, линейный прирост, радиальный прирост, биотоп, сумма осадков, температура, Кандалакшский залив, Республика Карелия

Для цитирования: Кухта А.Е., Максимова О.В., Кузнецова В.В. Воздействие климатических факторов на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на побережье Кандалакшского залива Белого моря // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 105–119. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-105-119>

Original article

Influence of Climatic Factors on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth on the Coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea

Anna E. Koukhta¹✉, Candidate of Biology; ResearcherID: [A-9570-2016](https://orcid.org/0000-0002-3710-3578),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3710-3578>

Olga V. Maksimova^{1,2}, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAB-8632-2020](https://orcid.org/0000-0002-0569-8650),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0569-8650>

Veronika V. Kuznetsova³, Candidate of Geography; ResearcherID: [AAG-7392-2021](https://orcid.org/0000-0003-3155-7330),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3155-7330>

¹Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, ul. Glebovskaya, 20b, Moscow, 107058, Russian Federation; anna_koukhta@mail.ru✉

²University of Science and Technology MISIS, prosp. Leninskiy, 4, Moscow, 119049, Russian Federation; o-maximova@yandex.ru

³Institute of Geography Russian Academy of Sciences, per. Staromonetny, 29, Moscow, 119017, Russian Federation; kuznetsova@igras.ru

Received on April 11, 2021 / Approved after reviewing on July 22, 2021 / Accepted on August 01, 2021

Abstract. The purpose of this study is a comparative analysis of linear and radial increments of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a response to the growing conditions on the coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea, as well as an evaluation of the temperature and precipitation influences of the current and previous growing seasons. These were applied to the conventional methods of measurement and data analysis. The dynamics of growth in height and diameter were employed as indicators of the stands' response to habitat conditions. A statistical analysis of the growth rates was performed, which vary depending on habitat type, as well as an assessment of the connection between biometric indicators of the stands and the amount of precipitation and mean temperature. The significant differences in the series of linear increment increases were found as distinctions between biotopes, but they were absent for the radial increment. Therefore, it is possible to monitor the typical behavior of tree diversity independent of the biotope type using radial growth series. This provides the foundation for a long-term retrospective analysis of environmental impact on the stands by using the annual rings of the trees without taking growing conditions into account. Precipitation was determined to be a limiting factor for radial and linear growth throughout the phenophase of internodal growth and early wood formation. Temperature was identified



as a limiting factor for radial development only during the stages of late wood formation and resource accumulation for the following growing season. The high sensitivity of linear increases to climatic conditions was revealed, which makes it useful as a criterion for assessing the state of forest ecosystems over short time periods (up to 30 years). However, this, in turn, dictates the impossibility of forming long-term linear increment series, as for radial growth, which is a significant limitation of this method. The choice of linear or radial growth analysis methods is concluded to be determined by the goals of the intended study, i.e., monitoring forest ecosystems under current climate change conditions or long-term paleoclimate analysis.

Keywords: Scots pine, linear increment, radial increment, biotope, precipitation sum, temperature, Kandalaksha Bay, the Republic of Karelia

For citation: Koukhta A.E., Maksimova O.V., Kuznetsova V.V. Influence of Climatic Factors on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth on the Coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 105–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-105-119>

Введение

Развитие и продуктивность растительных сообществ напрямую зависят от климатических факторов. Повышенной уязвимостью в условиях изменения климата характеризуются арктические фитоценозы. В последние десятилетия регистрируются различные климатогенные преобразования биомов тайги и тундры [8, 10, 14, 24]. Для успешного выявления трендов и прогнозирования состояния бореальных лесных биогеоценозов необходимо иметь информацию о том, какие метеорологические факторы являются лимитирующими для роста древостоев. Решению этой задачи посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [8, 19, 20, 27].

Методы дендрохронологии с использованием рядов индексированных кольцевых приростов деревьев широко применяют с целью изучения многолетних взаимодействий климата и лесных экосистем. Получаемые данные содержат информацию об интегрированных откликах древостоев на воздействия температур, осадков и иных факторов внешней среды. В частности, дендрохронологический метод распространен при построении палеоклиматических реконструкций и исследованиях состояния экосистем прошлого [7, 22, 27]. В том числе известен ряд дендрохронологических исследований для побережья Белого моря [4, 5, 12].

В ранее опубликованных работах мы высказывали предположение, что параметры изменчивости радиального прироста в бореальных биотопах (а значит, и отклик на воздействие климатической системы) не зависят от характера условий произрастания. Получается, что дендрохронологические методы с использованием кольцевых хронологий применимы для оценок длительных периодов вне зависимости от условий произрастания [19, 20].

При использовании дендрохронологического метода в качестве исходных данных для анализа могут служить прирост в высоту и прирост по диаметру. Для более коротких временных периодов (до 30 лет) оценка отклика деревьев на внешние воздействия производится по приростам в высоту [19, 25]. Почки возобновления древесных пород, из которых развиваются междуузлия, в противоположность камбию, обеспечивающему рост дерева в ширину, представляют собой основную мишень прессинга метеорологических факторов [8, 19, 20]. Линейным приростам свойственна бóльшая, чем у радиальных, зависимость

от внешних факторов, и, следовательно, реакции на факторы внешней среды более очевидны. Ограничением метода дендрохронологии по линейным приростам в отличие от анализа по радиальным является короткий период, в течение которого возможно изучение климатического сигнала. Дендрохронологический метод, направленный на анализ прироста годичных колец и их различных параметров (ранняя, поздняя древесина, максимальная плотность, анатомические характеристики и проч.), широко используется для дендроклиматических реконструкций [11, 22, 27] и обладает большей протяженностью временных рядов по сравнению с анализом по линейному приросту. Поэтому оба метода в совокупности представляют интерес для изучения как регионального, так и локального климатического сигнала за разные временные интервалы [6, 19, 20].

Цель – проанализировать изменчивость линейных и радиальных приростов в зависимости от типа биотопа и выявить причины сходств/различий их динамики, а также определить лимитирующие рост древостоев климатические факторы в разных местообитаниях на побережье Белого моря.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено в государственном комплексном (ландшафтном) заказнике регионального значения «Полярный круг», в Республике Карелия, на побережье Кандалакшского залива Белого моря (66°32' с. ш. 33°11' в. д.). Территория расположена в Кольско-Печорской подпровинции Евразийской таежной области, в Северо-европейской флористической провинции, на стыке 3 флористических районов – Имандровского, Варзугского и Топозерского. Преобладающим типом растительности являются северотаежные леса [10]. Мурманская область находится в Атлантико-арктической климатической области умеренного пояса, в зоне избыточного увлажнения [1]. Согласно Л.С. Бергу [6], средообразующими факторами в бореальных биогеоценозах являются гумидный климат, а также микро- и мезорельеф местности. Высокий уровень разнообразия ландшафтов обуславливает мозаичность местообитаний и многообразие условий произрастания.

В соответствии с классической типологией В.Н. Сукачева [13], выделены 3 основных типа местообитаний (биотопов): влажные, свежие и сухие. Влажные биотопы представляют собой сосняки сфагновые (*Pineta sylvestris fruticulososphagnosa*). Для свежих биотопов обычны сосновые древостои (*Pineta fruticulosohylocomiosa*) с примесью ели европейской (*Picea abies* (L.) Н. Karst.), березы повислой (*Betula pendula* Roth) и рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* Kom. ex Gatsch). В сухих биотопах, на так называемых китовых лбах – выходах скальных пород – обычны сосняки лишайниковые (*Pineta sylvestris cladinoso*) [13, 15].

Для анализа отклика древостоев сосны на изменения климатических параметров были использованы результаты измерений линейных приростов (т. е. годичных приростов междуузлий) сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., 1753 (класс Pinopsida, порядок Pinales, семейство Pinaceae) [10, 26].

Измерения линейных приростов подроста, молодняка и припевающих деревьев проводились в 2007 г. по методике, представленной в [8, 19]. Деревья указанных возрастных классов в рассматриваемых бореальных фитоценозах не превышают 2 м в высоту. Точность измерений определялась используемым средством измерений – мерной рулеткой. Пробные площади, каждая радиусом по 10 м, были заложены маршрутным методом в свежих (7 пробных площадей), сухих (8 пробных площадей) и влажных (4 пробных площади) местообитаниях

(всего 19 пробных площадей). На каждой пробной площади случайным образом отбиралось и измерялось по 5 деревьев одного класса возраста без видимых повреждений. Таким образом, в свежих биотопах рассматривалось ежегодно 35 деревьев, в сухих – 40, во влажных – 20 (всего 95 деревьев). У выбранных экземпляров определялись размеры междуузлия стволика/ствола начиная с верхнего и до последнего четко различимого над корневой шейкой. В результате этих измерений был получен архив за период 1980–2007 гг.

Для оценки параметров радиальных приростов взяты керны у 15 деревьев в свежих биотопах, в сухих биотопах – у 15 деревьев, во влажных – у 12. Используются дендрохронологические образцы сосны обыкновенной, отобранные из живых деревьев. Для каждой пробной площади измерена ширина годовых колец – радиальный прирост древесины. Измерения производились при помощи специализированной программы TsapWin (точность составляла 0,01 мм). Контроль качества образцов выполнялся с помощью программы Cofecha [21, 22]. Ко всем образцам применялось 100-летнее линейное сглаживание [18]. Этот фильтр позволяет удалить неклиматический сигнал из ряда дендрохронологических данных (ежегодный прирост годовых колец).

Ряды радиальных и линейных приростов индексировались, т. е. из них исключалась возрастная компонента. В дендрохронологических сериях возрастная тренд [16, 29] удалялся с помощью программы ARSTAN [17], для чего значение линейного прироста за каждый год поделено на значение точечной аппроксимирующей функции за этот год. Результатом такой процедуры служили динамические ряды индексов приростов, для которых становилось возможным проведение сравнения биометрических показателей деревьев разного возраста на воздействие климатических факторов с учетом мозаичности местообитаний изучаемых древостоев [7, 9, 11, 19, 20]. Для получения устойчивых выводов по отношению к анализу изменчивости индексов приростов и их связи с метеорологическими факторами производилось усреднение индексов по всем деревьям площадок указанного биотопа за каждый год.

Метеоданные получены с сайта Всероссийского Научно-исследовательского института Гидрометеорологической Информации (<http://meteo.ru/>) по данным метеорологической станции Кандалакшского государственного природного заповедника [2, 3]. Длина рядов метеоданных соответствует длине наблюдений за линейным и радиальным приростами – общий период для серий составляет 21 год, с 1984 по 2005 г.

Для исследования связи линейных и радиальных приростов со средними температурами и суммарными осадками выбирались периоды с июля по август предшествующего года и с апреля по август текущего. Данный период выбран для анализа, поскольку фенофаза активного роста почки возобновления длится с середины вегетационного сезона до осени.

Для первичного анализа вариабельности индексов линейных и радиальных приростов используется диаграмма box-and-whiskers (ящик с усами), которая позволяет проводить сравнение массивов разных объемов не только по медианным значениям (размечаемым внутри ящика), но и оценивать вариабельность каждой группы по размерам ящичков, границы которых задаются 1-м и 3-м квартилями [28]. Для статистической оценки влияния типа биотопа произрастания сосны на вариабельность ее линейных и радиальных приростов использовался непараметрический критерий Краскела–Уоллиса (H -критерий)

[23]. Этот критерий свободен от типа распределения данных, что при небольших объемах выборок, как в нашем случае, исключает возможность ошибок предположения нормальности данных. Критерий основывается на проверке равенства медиан нескольких групп [1], H -статистика критерия имеет вид

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^m \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1),$$

где n_i – число наблюдений в группе i ; $N = \sum_{i=1}^m n_i$ – общее число наблюдений во всех m группах; R_i – сумма рангов наблюдений в группе i .

Данные как по линейному, так и по радиальному приростам междуузлий на территории заповедника за каждый отдельный год подвержены сильной вариабельности, поэтому для выявления корреляционных связей с осадками и температурами вместо использования среднего прироста за год выбрано его медианное значение. Медианы устойчивы к экстремальным значениям в выборке (выбросам) и тем самым дают более полное представление о «типичном» значении приростов междуузлий, чем простое среднее. Для оценки связи медиан индексов линейных приростов междуузлий сосны и суммарных атмосферных осадков, а также температур использовались коэффициенты корреляции Пирсона (r) с оценкой значимости по критерию Стьюдента на уровне $\alpha = 0,05$. Для реализации корреляционно-регрессионного анализа временных рядов и статистического оценивания применялись программный модуль Statistica 15 и пакет Excel 2016.

Результаты исследования и их обсуждение

Вариабельность линейных и радиальных приростов в различных типах биотопов. Ранее проведенные нами исследования позволили установить, что изменчивость приростов как показатель отклика древостоев на воздействие внешних факторов зависит от типа местопроизрастания [7, 9, 19, 20]. В данной работе индексы линейных и радиальных приростов также представлены для 3 типов биотопов: свежий, влажный и сухой [13]. Для оценки влияния типа биотопа на линейные и радиальные приросты сосны взят период с 1984 по 2005 г., так как для этого периода имеются сопоставимые ряды индексов приростов. Вариабельность приростов визуальна представлена на рис. 1 в виде диаграммы box-and-whiskers [28], отображающей различия изменчивости от года к году в каждом биотопе как в интерквартильном разбросе (IQR), так и в размахе этих значений (R).

Визуальный анализ показателя вариабельности IQR для индексов линейных и радиальных приростов выявил следующее. Для линейных приростов продемонстрирована меньшая межгодовая изменчивость во влажных и сухих биотопах по сравнению со свежими (рис. 1, *a*). Это объясняется тем, что в данном биоме свежие биотопы представляют собой зону экологического оптимума для сосны, а сухие и влажные местообитания – зону пессимума, где, согласно одному из основных экологических принципов – закону Шелфорда, отмечено жесткое лимитирование по ряду ресурсов, в том числе по количеству влаги в субстрате. Следовательно, как показано в наших ранее опубликованных работах [8, 19], давление естественного отбора в свежих биотопах ниже, чем в сухих и влажных. Межгодовая изменчивость индексов радиальных приростов визуальна больше, но от биотопа к биотопу различия IQR явно не выражены (рис. 1, *b*).

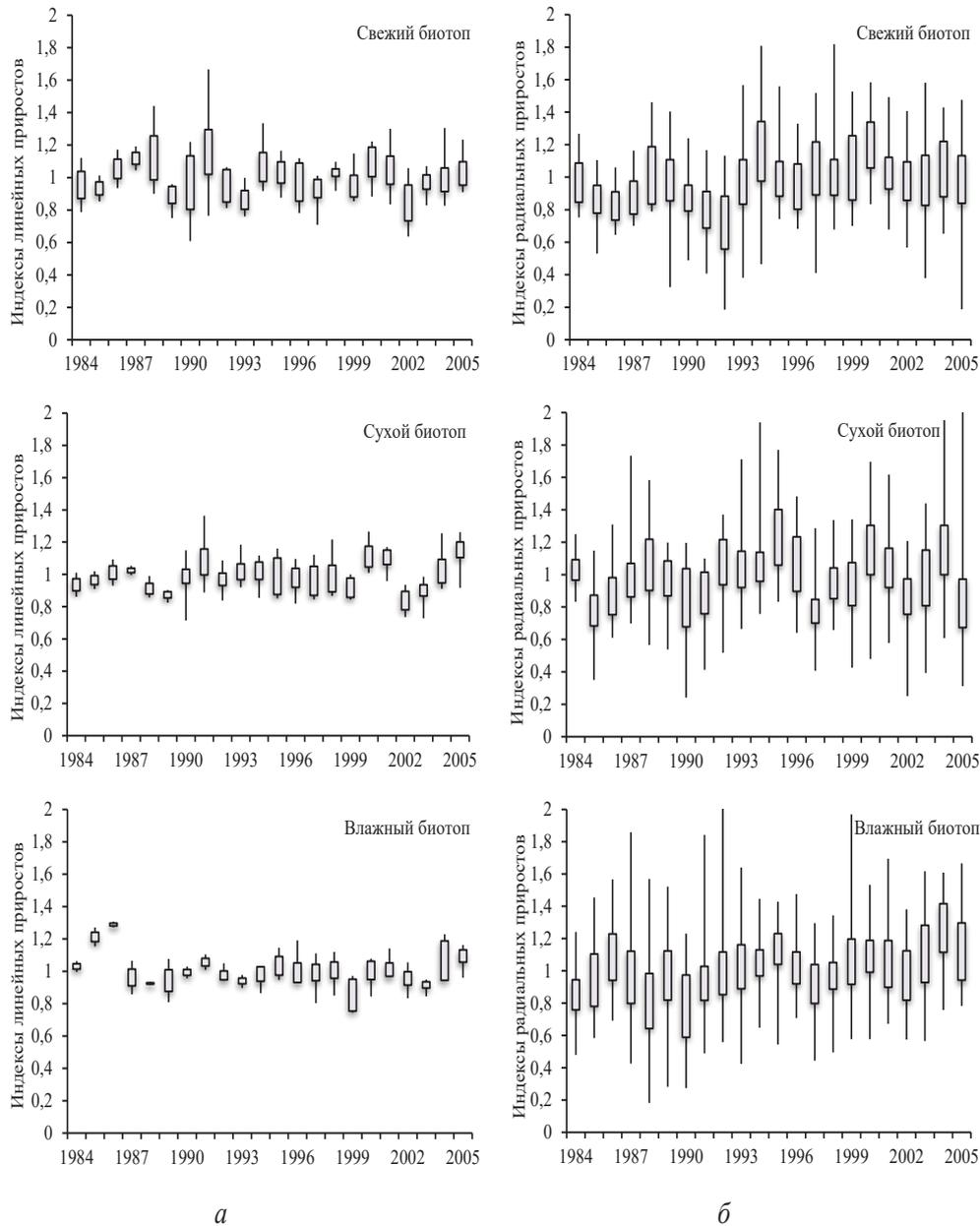


Рис. 1. Диаграммы для индексов приростов сосны в 3 типах биотопов заказника «Полярный круг» с 1984 по 2005 г.: *a* – линейных; *б* – радиальных

Fig. 1. Box-and-whiskers plots for Scots pine increment indices in three biotope types of the Polar Circle Nature Reserve from 1984 to 2005: *a* – linear; *б* – radial

Статистическое сравнение рядов показателей *IQR* для разных типов биотопов с помощью непараметрического *H*-критерия выявило:

значимые отличия *IQR* для индексов линейных приростов от биотопа к биотопу ($p = 0,008 < \alpha$), при этом в свежих биотопах *IQR* значимо больше;

незначимые отличия *IQR* для индексов радиальных приростов ($p = 0,8213 > \alpha$).

Таким образом, характеристики различных типов биотопов следует признавать разными с точки зрения воздействия на линейные приросты при уровне значимости α и с точки зрения воздействия на радиальные приросты. Гистограммы, составленные для показателя IQR , имеют колоколообразный вид для радиальных приростов (рис. 2) и тем самым дополнительно показывают однородность их вариабельности от биотопа к биотопу в отличие от гистограмм для линейных приростов. Это означает, что характер изменчивости радиальных приростов (и, следовательно, их отклик на воздействие факторов среды) сходен в разных типах биотопов, т. е. во всех условиях произрастания.

В отличие от радиальных приростов параметры изменчивости линейных приростов не дают статистического подтверждения сходства от биотопа к биотопу, параметры вариабельности IQR значимо различаются для влажных, сухих и свежих местообитаний.

Дополнительное исследование равенства медианных значений индексов радиальных приростов (в условиях статистической незначимости различий вариабельности) по H -критерию также показывает незначимые отличия: полученная расчетная статистика критерия $p = 0,8338 > \alpha$. Это подтверждает независимость радиальных приростов сосны от типа биотопа, что дает возможность наблюдать за данными показателями вне зависимости от местообитания. Дополнительный анализ массивов индексов радиальных приростов во времени также выявил однородность от биотопа к биотопу, что является еще одним доказательством возможности проведения анализ отклика прироста на воздействие климатических факторов вне зависимости от типа биотопа.

Связь линейных и радиальных приростов со средними температурами и суммарными осадками. Изменчивость параметров роста сосны в высоту зависит от типа биотопа, т. е. линейный прирост более подвержен случайному влиянию различных факторов среды обитания. Для оценки связи прироста с климатическими параметрами целесообразно рассматривать связь с его медианными значениями как центральной тенденцией выборки. Ввиду полученных значимых различий вариабельности индексов линейных приростов относительно типа биотопа далее исследуются медианные значения и радиальных, и линейных приростов для сопоставимости результатов. Как было отмечено, проводить наблюдения за типичным поведением изменчивости радиальных приростов возможно вне зависимости от типа биотопа, поэтому далее будем рассматривать для индексов радиальных приростов общий массив данных. Выделим 2 периода текущего года: апрель–май, когда происходит активный рост в высоту, а радиальный прирост осуществляется за счет ранней древесины (в этот период апикальный рост зачастую доминирует над ростом ствола в ширину), и июнь–август, когда доминирует кольцевой прирост (за счет образования поздней древесины), а междоузлия замедляют и в дальнейшем прекращают развитие. Для прошлого вегетационного сезона выделим август–сентябрь как период формирования сосной почек возобновления, обеспечивающих рост побегов в следующем году. Рассчитанные коэффициенты корреляции с величинами суммарных атмосферных осадков вегетационных периодов показывают (табл. 1):

значимые положительные связи наблюдаются в период апреля–мая текущего года как для радиальных приростов ($r = 0,35$), так и для линейных по краям экологической ниши (в сухих биотопах $r = 0,32$ и во влажных $r = 0,35$); в период августа–сентября прошлого года отмечается значимая связь для линейных приростов в сухих биотопах ($r = 0,34$);

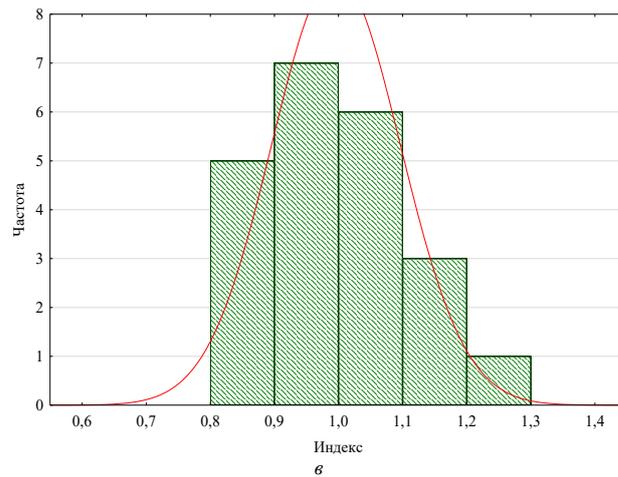
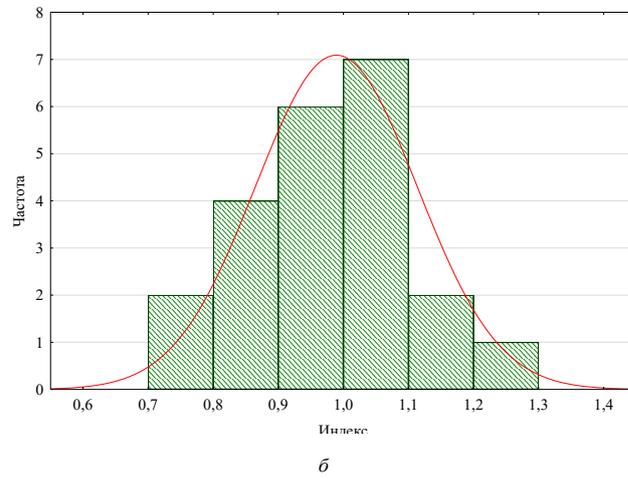
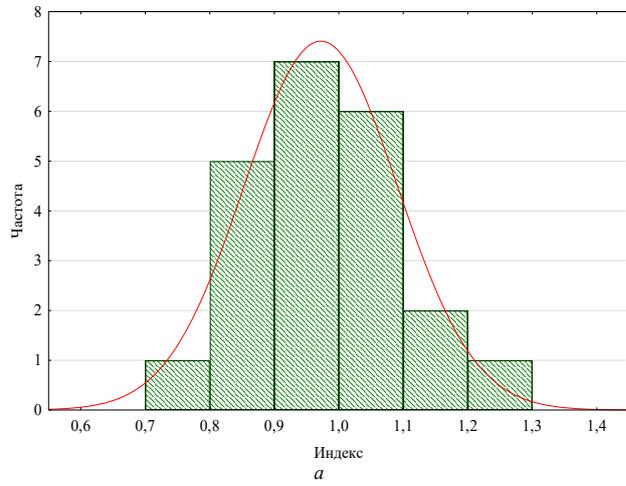


Рис. 2. Гистограммы для показателя вариабельности IQR индексов радиальных приростов в различных биотопах, 1984–2005 гг.: a – свежий; $б$ – сухой; $в$ – влажный

Fig. 2. Histograms for IQR variability of radial increment indices in different biotopes, 1984–2005 years: a – fresh; $б$ – dry; $в$ – moist

значимые отрицательные связи обнаружены только для линейных приростов во всех биотопах в период июня–июля текущего года ($r = -0,43; -0,30; -0,37$) для свежих, влажных и сухих биотопов соответственно.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между медианами индексов линейных и радиальных приростов сосны и суммами осадков за 1986–2005 гг.
Correlation coefficients between medians of pine linear and radial increments indices and total precipitation level between 1986–2005 years

Период осадков	Индексы приростов для биотопа			
	линейных			радиальных
	свежий	сухой	влажный	объединенный
Апрель–май текущего года	0,11	0,32	0,35	0,35
Июнь–июль текущего года	-0,43	-0,30	-0,37	–
Июнь–август текущего года	–	–	–	-0,07
Август–сентябрь прошлого года	0,12	0,34	0,08	0,05

Примечание: Здесь и в табл. 2 полужирным шрифтом выделены индексы, значимые на уровне 0,05.

Причина положительной связи линейных приростов в сухих биотопах с осадками в начале лета очевидна: этот период – фенофаза апикального роста, в течение которой формирование междоузлий требует наличия дефицитной в данных условиях произрастания влаги. Во 2-й половине фенофазы роста междоузлий атмосферные осадки являются причиной вымывания и обеднения субстрата, на котором развивается корневая система сосны, и, следовательно, снижения длины междоузлий. Положительные связи приростов с осадками августа–сентября предыдущего вегетационного периода объясняются тем, что осадки компенсируют недостаток влаги, необходимой для развития почек возобновления и, соответственно, прироста следующего года.

Во влажных биотопах в начале лета атмосферные осадки, поступая в холодную и закисленную среду обитания корневой системы деревьев, делают влагу доступной для успешного роста междоузлий. В середине вегетационного сезона избыток осадков, напротив, вызывает у деревьев водный стресс, из-за чего рост дерева в высоту замедляется. Этим объясняется отрицательное значение коэффициента корреляции между осадками и линейным приростом в середине лета во влажных биотопах.

В свежих биотопах древостои не испытывают дефицита влаги. Кроме того, район исследований относится к области избыточного увлажнения [1, 7], и при поступлении осадков во 2-й половине фенофазы роста междоузлий деревья также испытывают водный стресс, препятствующий оптимальному формированию кроны. Следовательно, коэффициент корреляции имеет отрицательное значение.

В отличие от линейных радиальные приросты положительно связаны с количеством осадков лишь в начале фенофазы формирования ранней древесины. В дальнейшем в течение вегетационного сезона рост стволов в ширину не связан с поступлением атмосферной влаги.

Коэффициенты корреляции линейных и радиальных приростов со средними температурами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между медианами индексов линейных и радиальных приростов сосны и средними температурами за 1986–2005 гг.
Correlation coefficients between medians of pine linear and radial increments indices and mean temperatures between 1986–2005 years

Период осадков	Индексы приростов для биотопа			
	линейных			радиальных
	свежий	сухой	влажный	объединенный
Апрель–май текущего года	–0,04	–0,06	–0,21	0,13
Июнь–июль текущего года	–0,17	–0,06	–0,21	–
Июнь–август текущего года	–	–	–	0,41
Август–сентябрь прошлого года	–0,32	0,09	0,26	0,43

Значимая положительная связь со средними температурами в период активного радиального прироста сосны (июнь–август текущего года, $r = 0,41$) и период прошлого года (август–сентябрь, $r = 0,43$) с индексами радиальных приростов обусловлена необходимостью набора сумм эффективных температур для успешного прохождения фенофазы формирования поздней древесины в текущем сезоне и накопления ресурса для роста ствола в будущем году. Напротив, для индексов линейных приростов в свежих биотопах наблюдается значимая отрицательная связь со средними температурами августа–сентября прошлого года ($r = -0,32$) по причине негативного воздействия повышения температур (и, как следствие, нехватки влаги) на качество почек возобновления и прироста в высоту на следующий год.

На величину кольцевого прироста текущего года помимо рассмотренных факторов влияет множество других, таких как содержание CO_2 в воздухе, обеспеченность почвы минеральными элементами, лесорастительные условия и др. Поэтому полученные коэффициенты корреляции радиального прироста с суммарными осадками и средними температурами отражают значимую связь, но не подтверждают прямую зависимость.

Заключение

На материале исследования древостоев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* комплексного (ландшафтного) заказника «Полярный круг», расположенного на побережье Кандалакшского залива Белого моря, показано, что связь параметров изменчивости радиальных приростов с характером местообитания статистически незначима. Следовательно, отклик данных показателей на воздействие внешних (в том числе климатических) факторов можно ожидать сходным и в сухих, и в свежих, и во влажных биотопах. Это дает основание к осуществлению долгосрочного ретроспективного анализа взаимоотношений древостоев и среды с использованием древесно-кольцевых хронологий без учета условий произрастания.

Обнаружено несходство отклика линейных приростов на воздействие климатических факторов в сухих, влажных и свежих биотопах. Другими словами, тип биотопа является существенным условием для формирования характера изменчивости длин междуузлий. Указанная закономерность позволяет отделить климатически обусловленные реакции от межгодовой индивидуальной изменчивости деревьев, т. е. до определенной степени снизить уровень «шума», маскирующего искомые тренды.

Подтверждена роль осадков как лимитирующего фактора для радиальных и линейных приростов (для последних – в сухих и влажных биотопах, т. е. в зонах экологического пессимума) в ходе фенофазы роста междуузлий и развития ранней древесины. Лимитирующая роль температур выявлена для радиальных приростов лишь на этапах формирования поздней древесины и накопления ресурсов для роста в следующем вегетационном сезоне. Линейные приросты в отличие от радиальных статистически значимо зависят от температур и осадков в ходе всех фенофаз текущего и предыдущего вегетационного сезонов и поэтому более репрезентативны при осуществлении мониторинга лесных экосистем, хотя и неприменимы для создания длительных хронологий из-за коротких рядов измерений.

Таким образом, линейные приросты (с учетом их чувствительности к воздействиям климатических факторов) являются более информативным инструментом оценки состояния лесных экосистем за короткий (до 30 лет) период, чем радиальные. Однако основным ограничением при использовании линейных приростов для анализа зависимости хода роста сосны от климатических факторов становится невозможность формирования многолетних рядов, таких, как для радиальных приростов, в силу возрастных изменений деревьев.

Выбор методов анализа по линейным или по радиальным приростам определяется целями планируемого исследования – мониторинга лесных экосистем в современных условиях изменения климата или долгосрочного палеоклиматического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Моск. ун-т, 1956. 128 с.
Alisov B.P. *Climate of the USSR*. Moscow, Moscow State University Publ., 1956. 128 p. (In Russ.).
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Корицунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 21.03.21).
Bulygina O.N., Razuvayev V.N., Korshchnova N.N., Shvets N.V. *Description of the Data Set of Monthly Precipitation Totals at the Stations in Russia*. Database of All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Certificate of state registration of the database №. 2015620394. (In Russ.).
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных №. 2014621485. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 22.03.21).
Bulygina O.N., Razuvayev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. *Description of the Data Set of the Mean Monthly Air Temperature at the Stations in Russia*. Database of

All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Certificate of state registration of the database No. 2014621485. (In Russ.).

4. Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н. Дендрохронология Соловецких островов // География: развитие науки и образования. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2018. Т. 1. С. 394–398.

Dolgova E.A., Matskovskiy V.V., Solomina O.N. Dendrochronology of the Solovetsky Islands. *Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya*. Vol. 1. Sankt Petersburg, A.I. Herten Russian State Pedagogical University Publ., 2018, vol. 1. pp. 394–398. (In Russ.).

5. Долгова Е.А., Соломина О.Н., Мацковский В.В., Добрянский А.С., Семеняк Н.А., Шпунт С.С. Пространственная изменчивость прироста сосны на Соловецких островах // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2019. № 2. С. 41–50.

Dolgova E.A., Solomina O.N., Matskovskiy V.V., Dobryanskiy A.S., Semenyak N.A., Shpunt S.S. Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2019, no. 2, pp. 41–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019241-50>

6. Кузнецова В.В., Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Кухта А.Е. Связь линейного и радиального прироста сосны обыкновенной с осадками разного генезиса в лесах Керженского заповедника // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2020. № 1. С. 93–102.

Kuznetsova V.V., Chernokulskiy A.V., Kozlov F.A., Kukhta A.E. Connection Between the Linear and Radial Growth of Scots Pine with Sediments of Different Genesis in the Forests of the Kerzhensky Reserve. *Izvestiya RAN, Seriya Geograficheskaya*, 2020, no. 1, pp. 93–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556620010124>

7. Кухта А.Е. Влияние температуры и осадков на годичный линейный прирост сосны обыкновенной на берегах Кандалакшского залива // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2009. № 1. С. 61–67.

Kukhta A.E. Influence of Temperature and Precipitation on the Annual Linear Growth of Scots Pine on the Shores of the Kandalaksha Bay. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2009, no. 1, pp. 61–67. (In Russ.).

8. Кухта А.Е., Попова Е.Н. Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31, № 3-4. С. 33–45.

Kukhta A.E., Popova E.N. Climatic Signal in the Linear Growth of Scots Pine in Boreal Phytocenoses of the White Sea Coast. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ecosystem*, 2020, vol. 31, no. 3-4, pp. 33–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2020-3-33-45>

9. Кухта А.Е., Румянцев Д.Е. Линейный и радиальный приросты сосны обыкновенной в Волжско-Камском и Центрально-Лесном государственных природных заповедниках // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 3. С. 88–93.

Kukhta A.E., Rumyantsev D.E. Linear and Radial Increments of Scots Pine in the Volga-Kama and Central-Forest State Natural Reserves. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2010, no. 3, pp. 88–93. (In Russ.).

10. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1983. 215 с.

Ramenskaya M.L. *Analysis of the Flora of Murmansk Region and Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 215 p. (In Russ.).

11. Румянцев Д.Е., Епишков А.А., Липаткин В.А., Волкова Г.Л. Статистические закономерности изменчивости временных рядов радиального прироста сосны обыкновенной по показателям синхронности на территории Русской равнины // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 5. С. 688.

Rumyantsev D.E., Lipatkin V.A., Epishkov A.A., Volkova G.L. Statistical Patterns of Variability in the Time Series of the Radial Growth of Scots Pine in Terms of Synchronism in the Territory of the Russian Plain. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education, 2015, no. 5, art. no. 688. (In Russ.).

12. Соломина О.Н., Мацковский В.В., Жуков Р.С. Дендрохронологические «летописи» «Вологда» и «Соловки» как источник данных о климате последнего тысячелетия // Докл. Акад. наук. 2011. Т. 439, № 4. С. 539–544.

Solomina O.N., Matskovskiy V.V., Zhukov R.S. The Vologda and Solovki Dendrochronological «Chronicles» as a Source of Information About the Climate Conditions of the Last Millennium. *Doklady Akademii nauk*, 2011, vol. 439, no. 4, pp. 539–544. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1028334X11080071>

13. Сукачев В.Н. Избранные труды: в 3 т. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии / под общ. ред. Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1972. 419 с.

Sukachev V.N. *Selected Works in Three Volumes. Vol. 1: Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology*. Ed. by E.M. Lavrenko. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 419 p. (In Russ.).

14. Тишков А.А., Кренке-мл. А.Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4(20). С. 28–37.

Tishkov A.A., Krenke Jr. A.N. «Greening» of the Arctic in the XXI Century as a Synergistic Effect of Global Warming and Economic Development. *Arktika: ekologiya i ekonomika* = Arctic: Ecology and Economy, 2015, vol. 4(20), pp. 28–37. (In Russ.).

15. Ценофонд лесов Европейской России. Режим доступа: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/princip.htm> (дата обращения: 02.03.21).

Typological Diversity of Forests in European Russia. Database: Price Fund of European Russia.

16. Cook E.R., Holmes R.L. Guide for Computer Program ARSTAN. *The International Tree-Ring Data Bank Program Library Version*, 1996, vol. 2, pp. 75–87.

17. Cook E., Peters K. The Smoothing Spline: A New Approach to Standardizing Forest Interior Tree-Ring Width Series for Dendroclimatic Studies. *Tree-Ring Bulletin*, 1981, vol. 41, pp. 45–53.

18. Chernogaeva G.M., Kuhta A.E. The Response of Boreal Forest Stands to Recent Climate Change in the North of the European Part of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 418–424. <https://doi.org/10.3103/S1068373918060109>

19. Chernogaeva G.M., Kuznetsova V.V., Kukhta A.E. Precipitation Effects on the Growth of Boreal Forest Stands in the Volga Region. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, no. 12, pp. 851–857. <https://doi.org/10.3103/S1068373920120055>

20. Dolgova E., Cherenkova E., Solomina O., Matskovsky V. Influence of the Large-Scale Atmospheric Circulation Variations on Spruce Tree-Ring Growth from Solovki Islands (Russia). *Practical Geography and XXI Century Challenges. Proceedings of International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 4–6 June 2018*. Moscow, Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Geography RAS Publ., 2018, pp. 96.

21. Grissino-Mayer H.D. Evaluating Crossfading Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA, 2001, pp. 205–221.

22. Holmes R.L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, vol. 43, pp. 69–78.

23. Kruskal W.H., Wallis W.A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 1952, vol. 47, no. 260, pp. 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

24. Matskovsky V., Kuznetsova V., Morozova P., Semenyak N., Solomina O. Estimated Influence of Extreme Climate Events in the 21st Century on the Radial Growth of Pine Trees in Povolzhie Region (European Russia). *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 611, no. 1, art. no. 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012047>
25. Misi D., Puchalka R., Pearson C., Robertson I., Koprowski M. Differences in the Climate-Growth Relationship of Scots Pine: A Case Study from Poland and Hungary. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 3, p. 243. <https://doi.org/10.3390/f10030243>
26. *Pinus sylvestris*. The Gymnosperm Database. Available at: https://www.conifers.org/pi/Pinus_sylvestris.php (accessed 21.03.20).
27. Thabeet A., Vennetier M., Gadbin-Henry C., Dendelle N., Roux M., Caraglio Y., Vila B. Response of *Pinus sylvestris* L. to Recent Climatic Events in the French Mediterranean Region. *Trees*, 2009, vol. 23, no. 4, pp. 843–853. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0326-z>
28. Tukey J.W. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. *Biometrics*, 1949, vol. 5, no. 2, pp. 99–114. <https://doi.org/10.2307/3001913>
29. Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E., Darrigo R., Davi N., Esper J., Frank D., Gunnarson B., Hegerl G. Last Millennium Northern Hemisphere Summer Temperatures from Tree Rings. Part I: The Long-Term Context. *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 134, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.12.005>

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*326

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-120-135

Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке

А.В. Макаренко, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [GON-8614-2022](https://orcid.org/0000-0003-3889-9827),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3889-9827>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; makarenko@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 10.02.22 / Одобрена после рецензирования 23.05.22 / Принята к печати 26.05.22

Аннотация. Совершенствование методов и моделей предварительного расчета показателей эффективности применения манипуляторных лесозаготовительных машин на лесосечных работах преследует цель улучшить обоснованность использования тех или иных видов машин и технологий для определенных природно-производственных условий. Способом увеличения точности расчетных моделей является более полное и объективное отражение условий производственной среды и протекающих технологических процессов. Рассматривается задача по моделированию передвижения лесозаготовительной машины от одной рабочей стоянки к другой при выборе позиции с наибольшим количеством доступных деревьев. Обсуждается вопрос о распределении деревьев по территории лесосеки, разработан алгоритм и построена имитационная модель поиска мест позиционирования машины на рабочих площадках, выполнена статистическая обработка результатов. Имитационной моделью и ее программной реализацией были сформированы следующие массивы данных, необходимые для оценки эффективности работы машины: расстояние между рабочими стоянками машины с максимальным количеством доступных деревьев, время цикла заготовки и объем деревьев на стоянках. Представлены результаты статистической обработки указанных данных и обоснован выбор теоретических законов распределения вероятностей. Для оценки целесообразности выбора мест для рабочих стоянок машины с учетом расположения деревьев был использован критерий часовой производительности. Он рассчитан для варианта с фиксированным расстоянием передвижения машины, равным разности максимального и минимального вылета манипулятора, и для варианта при поиске мест стоянок с максимальным количеством доступных деревьев. Расчет критерия часовой производительности машины выполнен в виде функции случайных величин, характеризующих условия работы машины на стоянках. Для полученных результатов расчета критерия, который также является случайной величиной, произведена статистическая обработка данных. Сравнение значений критерия по вариантам показало высокую вероятность существенного увеличения производительности манипуляторной лесозаготовительной машины, которое в среднем составляет 8 % при среднем квадратическом отклонении 0,199, при



использовании варианта передвижения машины с выбором места рабочей стоянки с максимально возможным количеством доступных деревьев.

Ключевые слова: рабочая стоянка, валка деревьев, компьютерное моделирование, время цикла, случайная величина, производительность машины

Для цитирования: Макаренко А.В. Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 120–135. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-120-135>

Original article

Effective Positioning in Cutting Area of a Harvester Using Computer Modelling

Andrey V. Makarenko, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [GON-8614-2022](https://orcid.org/0000-0003-3889-9827), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3889-9827>

Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; makarenko@mgul.ac.ru

Received on February 10, 2022 / Approved after reviewing on May 23, 2022 / Accepted on May 26, 2022

Abstract. An improvement of methods and models for preliminary estimation of the performance of harvesters in timber production intends to support better justification of the use of certain harvester types and technologies for specific natural and production conditions. It is possible to increase the accuracy of calculation models with a more complete and realistic description of the production environment and operational processes. The article presents a modelling of the harvester's movements across cutting areas for selecting a position with the highest number of accessible trees. The investigational process involved the creation of an algorithm along with a simulation model and the statistical processing of the results. The problem-solving process required consideration of the tree's distribution within the cutting region. The data arrays, which were necessary for efficiency evaluation in the simulation model and its software implementation, were the following: the distance between the working stands of the machine with the maximum number of available trees, the time of cyclic processing, and the number of trees in the area. The results of the statistical analysis of the data are presented with justification from the theoretical laws of probability distribution. The choice of machine working stands, which considered the arrangement of the trees, was estimated using the productivity per hour index. The index was calculated with a constant distance parameter that is equal to the difference between the maximum and the minimum manipulator's movement, and it was also calculated for a stand with a maximum number of accessible trees. The calculation function for the index involves random variables that characterize the working conditions of the stand. The index itself is conceded as a random variable. The values for it were found by statistical data processing. A comparison of the values determined a high probability of a significant increase in the productivity of the harvester. At the stand with the maximum number of trees, it is estimated at around 8 % with a standard deviation of 0.199.

Keywords: working stand, harvesting, computer modelling, time of cyclic processing, random variable, productivity of a machine

For citation: Makarenko A.V. Effective Positioning in Cutting Area of a Harvester Using Computer Modelling. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 120–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-120-135>

Введение

Работа манипуляторных лесозаготовительных машин (валочно-пакетирующая и валочно-трелевочная машины, харвестер и др.), имеющих в наборе выполняемых операций валку или спиливание деревьев с последующей укладкой в пачку, осуществляется с передвижением машины по заданному маршруту при последовательных остановках на рабочих площадках, где производится заготовка определенного количества деревьев в зоне действия манипулятора. Производительность лесозаготовительной машины как один из показателей эффективности ее работы определяется суммарным объемом заготовленной древесины на рабочих площадках за конкретный период времени, который включает суммарную продолжительность работы машины на рабочих площадках, суммарное время переезда машины между площадками, а также дополнительное время на технологические переезды и обслуживание машины. Время цикла работы машины на площадке состоит из времени осуществления нескольких (по количеству деревьев) наборов повторяющихся элементов технологических операций по обработке деревьев. В число этих операций входят наведение манипулятора, выполнение операций захватно-срезающим устройством, валка или перенос дерева и др. [1, 4, 6, 11, 12]. Продолжительность выполнения операций определяется размерами и расположением деревьев относительно машины. Значительный объем экспериментальных исследований и имитационного моделирования работы манипуляторных лесозаготовительных машин при выполнении перечисленных технологических операций на рабочей площадке и в целом по разработке лесосеки отражен в ряде публикаций [2, 16–21].

На основании исследований [3, 7–9, 25] сделан вывод, что количество деревьев на рабочей площадке является случайной величиной, зависящей от среднего диаметра древостоя, запаса древесины на 1 га, расстояния вылета манипулятора машины. Перечисленные факторы – это внешние, или заданные условия работы. Особую группу составляют факторы управления, или решения, принимаемые оператором и подкрепленные компьютерными программами оптимизации и машинного обучения для выполнения технологических операций [6, 13, 24]. Одним из факторов данной группы является выбор места расположения машины (позиционирование) для осуществления операций по заготовке деревьев на рабочей площадке. Основными критериями для выбора места являются количество доступных деревьев для спиливания машиной и среднее время на обработку дерева. Расчет и максимизация 1-го из критериев проводятся с помощью методов аналитической геометрии при известном расположении деревьев относительно направления движения машины. Определение 2-го критерия, когда положение машины выбрано, можно выполнить имитационным моделированием технологических операций по заготовке доступных деревьев.

Выбор рационального места расположения машины и, соответственно, рабочей территории, с которой машина может спиливать деревья, позволяет

максимизировать загрузку машины и снизить долю времени перемещения, приходящуюся на обработку одного дерева. В то же время увеличение среднего количества заготавливаемых деревьев с одного места потребует соблюдения обоснованного порядка их спиливания.

Цель исследования – разработать алгоритм выбора рационального места позиционирования лесозаготовительной машины на рабочей площадке при сплошной рубке на основании критерия роста производительности при уменьшении времени обработки 1 дерева, а также программную реализацию данного алгоритма.

Объекты и методы исследования

Имитационное моделирование передвижения лесозаготовительной машины по лесосеке от одной рабочей стоянки к другой возможно при наличии следующих исходных данных: технических характеристик машины (прежде всего, максимального и минимального вылета манипулятора) и координат расположения деревьев в полосе движения машины. Для расчета времени цикла работы машины по спиливанию и обработке деревьев на стоянке также требуются данные о размерно-качественных характеристиках деревьев: диаметре в месте спиливания, высоте, породе, объеме, количестве и расположении сучьев.

Данные для формирования массива характеристик деревьев можно получить посредством изучения спутниковых снимков или данных аэрофотосъемки [5, 15, 22], наземного обследования лесосеки или разыгрывания значений при помощи вероятностных законов распределения [2, 10, 14, 23]. При разработке и отлаживании модели определение параметров и координат деревьев способом разыгрывания значений (методом Монте-Карло) имеет определенное преимущество, так как может предоставить значительное количество вариантов характеристик древостоя.

В настоящее время существуют отработанные методы разыгрывания координат деревьев и моделей хода роста древостоя. В работе [2] обосновывается метод разыгрывания координат деревьев как 2-мерной случайной величины при помощи равномерного закона распределения вероятностей. При исследовании производительности машин применяется способ разыгрывания расстояний между проекциями расположений деревьев на координатные оси по экспоненциальному, Эрланга или гамма- законам распределения [2]. При изучении процессов развития древостоя [14] распределение деревьев по площади рассматривается как однородное или неоднородное Пуассоновское поле точек с переменной интенсивностью произрастания деревьев на отдельных площадях. Для отражения в имитационных моделях неоднородности плотности произрастания деревьев [10, 14] используется 2-стадийный способ разыгрывания координат деревьев с комбинацией разных законов распределения вероятностей.

На рис. 1 представлен возможный вариант распределения положений деревьев на разрабатываемой ленте, который является примером для решения задачи по поиску оптимальных последовательных мест рабочих стоянок машины.

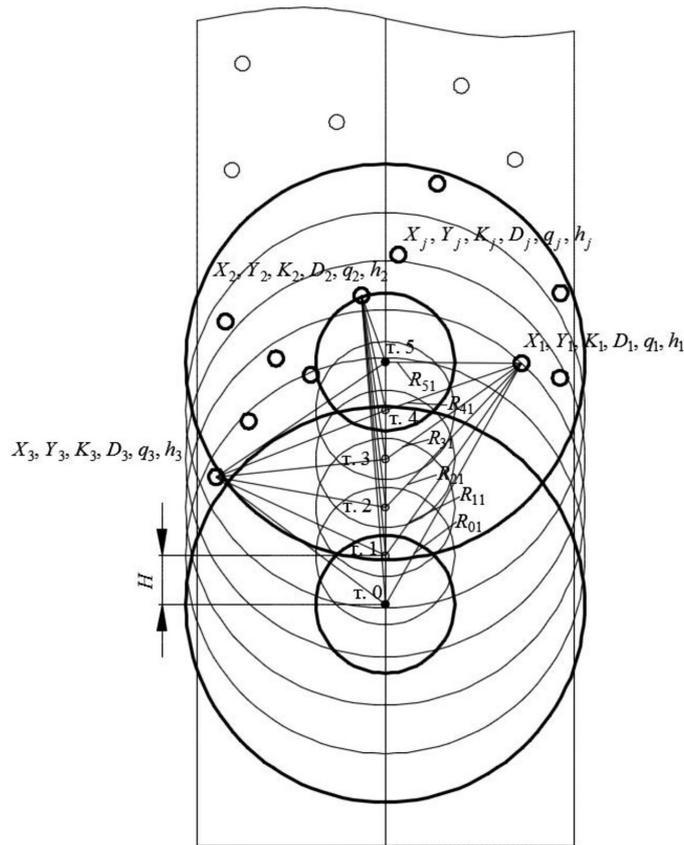


Рис. 1. Схема для моделирования передвижения манипуляторной лесозаготовительной машины при выборе оптимальной позиции. $X_j, Y_j, K_j, D_j, q_j, h_j$ – j -я запись параметров дерева на пасеке (координаты, отметка о выборе, диаметр, объем и высота соответственно); R_{ij} – расстояние от i -й стоянки машины до j -го дерева; $т. i$ – номер точки промежуточного позиционирования машины; H – модельный шаг передвижения машины

Fig. 1. The scheme for modelling the movement of a harvester when choosing the optimal position: $X_j, Y_j, K_j, D_j, q_j, h_j$ – j -th record of the parameters of the tree in a clearing (coordinates, selection mark, diameter, volume and height, respectively); R_{ij} – a distance from the i -th stand of the harvester to the j -th tree; $т. i$ – a number of the intermediate positioning point of the machine; H – a model step of the machine movement

Исходное положение машины на рис. 1 обозначено как $т. 0$. На расстоянии максимального вылета манипулятора R от исходного положения дерева спилены и появление новых деревьев на рабочей площадке возможно только при передвижении машины на новую позицию. Выбор нового места для машины с наибольшим количеством деревьев в зоне действия манипулятора выполняется методом последовательных приближений с шагом передвижения H . Алгоритм расчета передвижения машины представлен на рис. 2.

Работа алгоритма модели строится следующим образом. После передвижения машины на один модельный шаг происходит выполнение двух процедур. Первая процедура (модуль 1) производит перебор записей характеристик деревьев в массиве, которые расположены в зоне действия манипулятора машины с прежней позиции. При переборе записей осуществляется вычисление расстояний R_{ij} от нового положения машины до деревьев. По рассчитанным расстояниям проверяется, что деревья не вышли из зоны действия манипулятора и не приблизились к машине ближе чем на минимальный вылет r

$$R \leq R_{i,j} \leq r.$$

Если данное неравенство не соблюдается, то работа модели заканчивается, а координаты машины принимаются равными значениям на предыдущей позиции. Необходимо отметить, что невыполнение этого неравенства возможно только при передвижении машины более чем на $R-r$ от исходного положения.

В модуле 2 производится перебор записей характеристик деревьев, которые располагаются на территории разрабатываемой машиной пасаки, в массиве. Для сокращения расчетов в записи для каждого дерева введен параметр K , принимающий значение 0, если дерево не вырублено или не учтено на рабочей площадке. В противном случае параметр K принимает значение 1. Перебор записей – характеристик деревьев для расчетов расстояний – производится только при $K = 0$. В дальнейшем, как и в модуле 1, происходит сравнение расстояний от деревьев до места расположения машины со значениями максимального и минимального вылета манипулятора. Когда приведенное неравенство для проверяемого расстояния выполняется, характеристики дерева записываются в массив для рабочей площадки, а параметру K данного дерева присваивается значение 1. При невыполнении неравенства запись о дереве пропускается.

На основании составленной модели работы лесозаготовительной машины на пасаке в среде Visual Basic была разработана компьютерная программа, в которой основные этапы моделирования отражаются в отдельных формах. Пример работы форм программы представлен на рис. 3–5.

В результате работы модели по приведенному алгоритму и в среде компьютерной программы получается набор координат стоянок машины по пасечному волоку с максимальным количеством деревьев на рабочих площадках. Пример выбранных мест стоянок на нескольких пасаках лесосеки представлен на рис. 6.

Для принятых в разработанной модели характеристик манипулятора лесозаготовительной машины разница между максимальным и минимальным вылетом составляет 7,5 м. Данная величина представляет собой нижний предел расстояния между стоянками машины, который используется в аналитических расчетах производительности. Как видно из рис. 6, расстояние между стоянками в модели является случайной величиной, существенно превышающей нижний предел. В связи с этим производительность машины является функцией случайной величины расстояния перемещения между стоянками наряду с прочими случайными величинами лесорастительных условий.

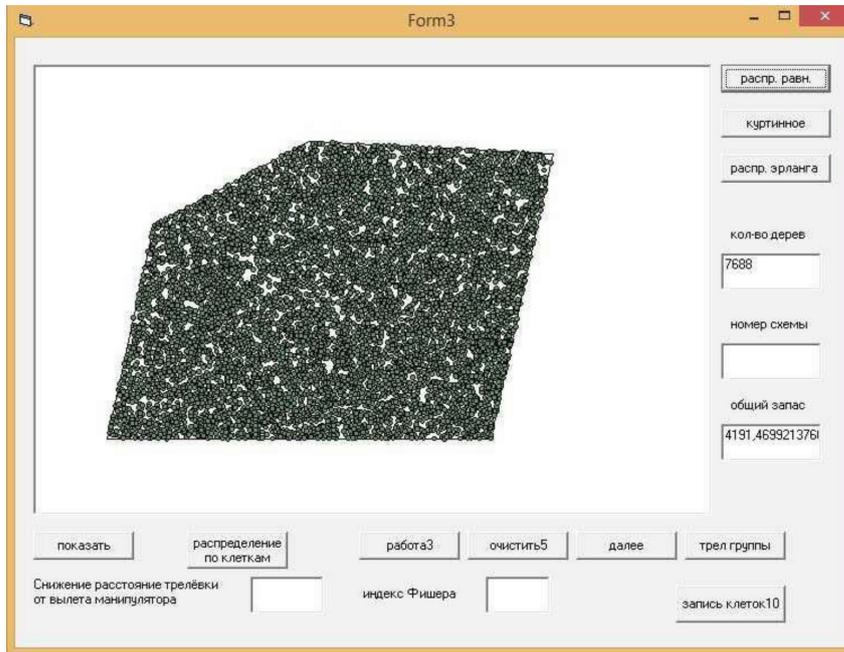


Рис. 3. Разыгрывание расположения деревьев на лесосеке
Fig. 3. Random generation of tree's locations in the cutting area

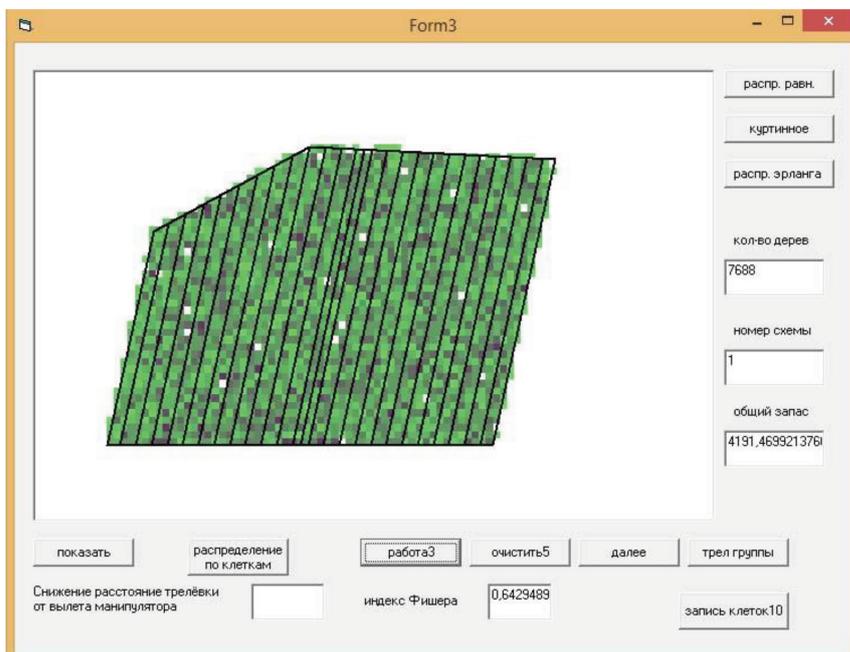
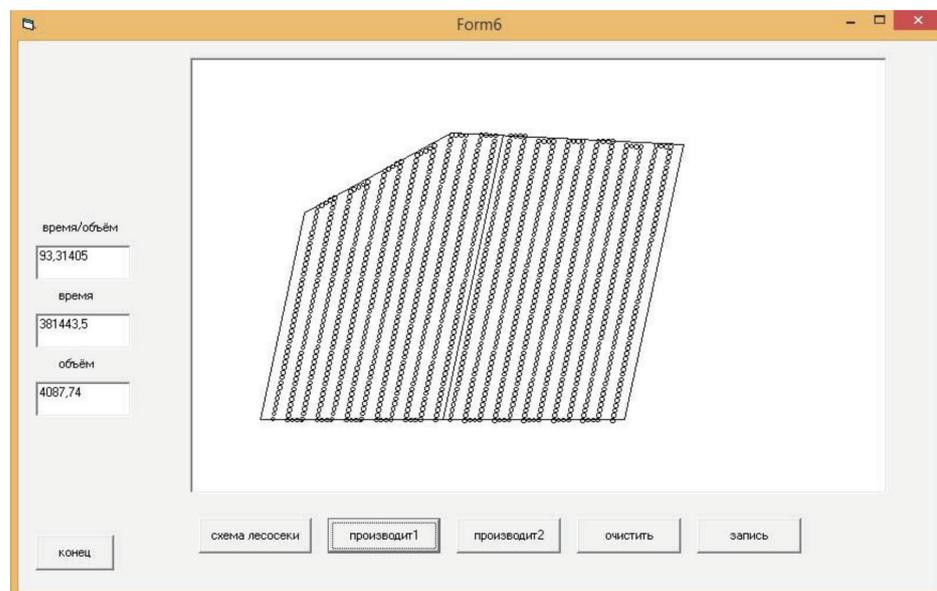
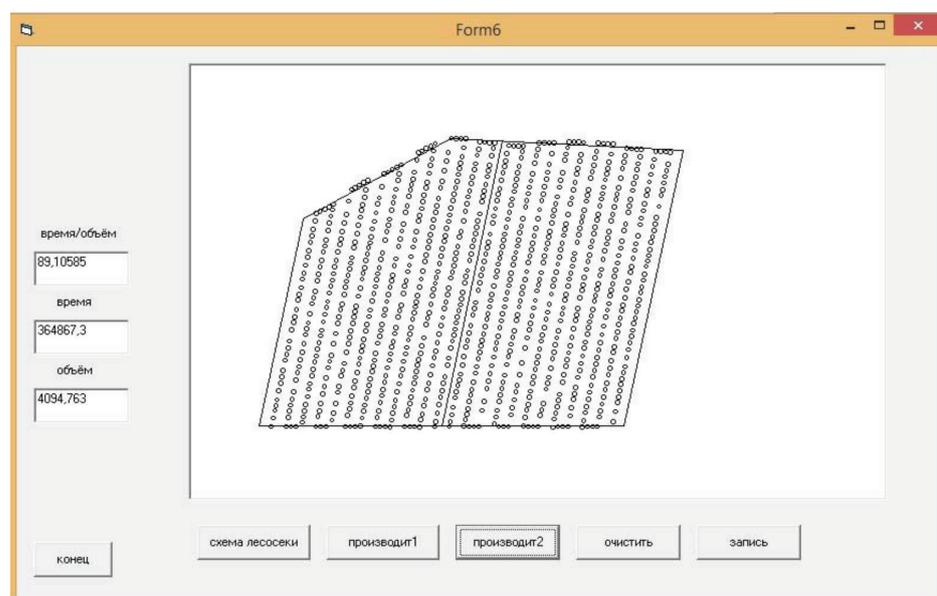


Рис. 4. Проектирование расположения трелевочных волоков и разбиение массива деревьев по пасекам
Fig. 4. Designing the location of the skidding trails and splitting the array of trees by clearing strips



а



б

Рис. 5. Моделирование работы лесозаготовительной машины при ее перемещении: а – на постоянное расстояние $R-r$; б – на площадки с максимальным количеством доступных деревьев

Fig. 5. Modeling the operation of a harvester when it moves: а – across the constant distance $R-r$; б – in the areas with the maximum number of available trees

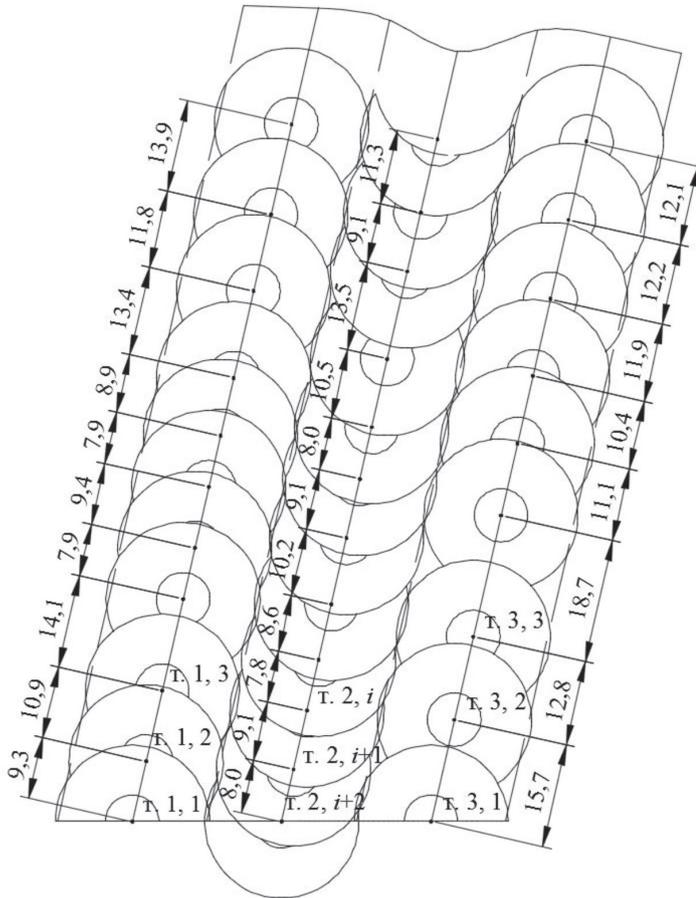


Рис. 6. Расположение рабочих стоянок машины с максимальным количеством доступных деревьев: т. j , i – центр стоянки для j -й пазеки и i -й стоянки

Fig. 6. Location of the working stands of the machine with the maximum number of available trees: т. j , i – parking center for the j -th clearing strip and the i -th stand

Результаты исследования и их обсуждение

Перед статистическим анализом полученных в результате моделирования данных о производительности лесозаготовительной машины была проведена статистическая обработка массива значений расстояния перемещения машины между стоянками с максимальным количеством доступных деревьев. Статистическое распределение массива данных аппроксимировано односторонне-усеченным нормальным законом распределения и гамма-распределением со смещением на величину минимального перемещения машины в массиве данных. Результаты статистической обработки и параметры законов распределения (рис. 7) следующие:

Статистическое распределение:	Усеченный нормальный закон распределения:	Гамма-распределение со смещением:
Минимальное... 7,8	Минимальное..... 7,8	Смещение..... 7,8
Максимальное... 18,7	Максимальное..... ∞	Максимальное..... ∞
Среднее..... 10,53	Среднее полного нормального закона..... 5,65	Интенсивность (критерий Колмогорова λ)..... 0,56
Среднее квадратическое отклонение..... 2,21	Среднее квадратическое отклонение полного нормального закона..... 18,2	Степень (параметр k).... 1,53
	Табличное значение χ^2 при уровне значимости 0,05..... 12,592	Табличное значение χ^2 при уровне значимости 0,05..... 12,592
	Расчетное значение χ^2 8,213	Расчетное значение χ^2 5,02

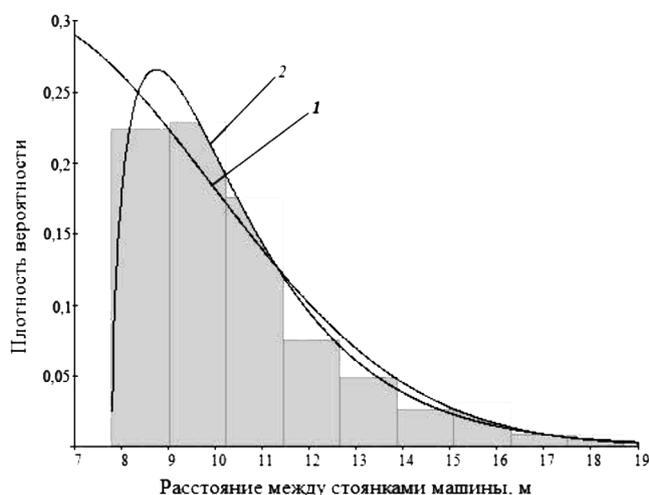


Рис. 7. Гистограмма и теоретические кривые распределения для случайного расстояния между стоянками: 1 – усеченный нормальный закон распределения вероятностей; 2 – сдвинутый гамма-закон распределения

Fig. 7. Histogram and theoretical distribution curves for a random value of the distance between parking lots: 1 – truncated normal probability distribution law; 2 – shifted gamma probability distribution law

На следующем этапе исследования была выполнена статистическая обработка смоделированных массивов данных времени цикла по заготовке деревьев на рабочих площадках при постоянном шаге перемещения машины $R-r$ (1-й вариант) и при шаге перемещения, получаемом при выборе площадок с максимальным количеством доступных деревьев (2-й вариант). Основные статистические параметры массива данных, параметры аппроксимирующих законов распределения вероятностей и значения критерия Пирсона χ^2 сведены в табл. 1. Несмотря на то, что для отдельных ограниченных по объему выборок наблюдалась асимметричность статистического распределения, для выборок значительного объема, охватывающих несколько пазек, распределение вполне симметричное и хорошо согласуется с нормальным законом распределения вероятностей.

Таблица 1

Параметры статистического распределения и нормального закона вероятностей времени цикла заготовки деревьев на рабочей площадке

The statistical distribution parameters and the normal probability law for the time of the cyclic processing on the operating area

Вариант перемещения машины	Значение			Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	$\chi^2_{\text{табл}}$	$\chi^2_{\text{расч}}$
	минимальное	максимальное	среднее				
На расстояние $R-r$	41,835	533,951	283,417	94,693	0,334	14,067	5,669
На моделируемое расстояние	42,120	715,490	373,462	115,767	0,310	12,592	6,923

Следующей случайной величиной, влияющей на производительность машины, является объем заготавливаемой древесины с одной рабочей площадки. Результаты статистической обработки массива данных этой случайной величины, полученных в результате моделирования, и параметры теоретических аппроксимирующих законов распределения вероятностей приведены в табл. 2. Как и ранее, рассматривались варианты перемещения машины между стоянками на расстояние $R-r$ и на расстояние, при котором достигается максимальное количество доступных деревьев.

Таблица 2

Параметры статистического распределения и нормального закона вероятностей объема заготавливаемой древесины на рабочей площадке

The statistical distribution parameters and the normal probability law for the volume of harvested wood on the operating area

Вариант перемещения машины	Значение			Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	$\chi^2_{\text{табл}}$	$\chi^2_{\text{расч}}$
	минимальное	максимальное	среднее				
На расстояние $R-r$	0,537	6,303	3,241	1,149	0,354	14,067	5,410
На моделируемое расстояние	1,441	8,356	4,550	1,429	0,314	12,592	9,349

На основании полученных при моделировании данных для двух вариантов перемещения машины рассчитывалась часовая производительность как функция случайных величин. Для 1-го варианта случайными величинами являются объем заготавливаемой древесины с одной площадки Q_p и время цикла работы машины на площадке $T_{\text{ц}}$. Для 2-го варианта кроме тех же двух величин добавляется третья случайная величина – расстояние перемещения между площадками $L_{\text{рас}}$. Скорость перемещения машины от стоянки к стоянке V принималась в диапазоне пониженной передачи 0–7 км/ч, что соответствует скорости харвестера, указанной в работе, выполненной в рамках названной выше научно-исследовательской темы.

Часовая производительность в виде функции случайных величин по вариантам рассчитывалась по формулам

$$П_{\text{ч1}} = \frac{3600Q_p}{T_{\text{ц}} + \frac{R-r}{V}};$$

$$P_{ч2} = \frac{3600Q_p}{T_{ц} + \frac{L_{рас}}{V}}$$

Статистическая обработка результатов расчетов случайных величин $P_{ч1}$, $P_{ч2}$, отношения $P_{ч2}/P_{ч1}$ и критерии согласия для аппроксимирующего теоретического нормального закона распределения позволила получить данные, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Параметры статистического распределения и нормального закона вероятностей часовой производительности

The statistical distribution parameters and the normal probability law for the productivity per hour index

Вариант	Значение			Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	$\chi^2_{табл}$	$\chi^2_{расч}$	λ
	мини-мальное	макси-мальное	среднее					
$P_{ч1}$	17,610	55,600	38,50	5,310	0,128	14,07	9,14	0,390
$P_{ч2}$	30,730	54,230	40,76	4,230	0,104	12,59	2,96	0,428
$P_{ч2}/P_{ч1}$	0,553	3,079	1,08	0,199	0,184	–	–	–

Из табл. 3 видно, что часовая производительность лесозаготовительной машины как по 1-му варианту передвижения, так и по 2-му вполне согласуется с нормальным законом распределением вероятностей по критериям Пирсона χ^2 и Колмогорова λ . Среднее отношения случайных величин $P_{ч2}/P_{ч1}$ равно 1,08, что говорит о превышении часовой производительности по 2-му варианту при выборе стоянок с максимальным количеством деревьев над производительностью по 1-му варианту с постоянным расстоянием $R-r$ между стоянками в среднем на 8 %.

Выводы

Результаты имитационного моделирования для выбранных исходных данных: среднего запаса на 1 га, среднего объема хлыста, вылета манипулятора машины – позволяют сделать следующие выводы.

1. Увеличение расстояния переезда между стоянками для варианта передвижения машины, при котором остановка производится в месте с максимальным количеством доступных для манипулятора деревьев (2-й вариант), по сравнению с вариантом, когда постоянное расстояние между стоянками равно разности максимального и минимального радиусов вылета манипулятора (1-й вариант), составляет 40,4 %. При этом отношение времени переезда к объему заготавливаемой древесины на рабочих площадках для обоих вариантов остается неизменным.

2. Время работы на рабочей площадке с максимальным количеством доступных деревьев (2-й вариант) увеличивается на 31,8 % по сравнению с 1-м вариантом, при этом отношение времени работы к объему заготовленной древесины снижается на 6,1 %. Такое снижение объясняется тем, что количество заготавливаемой древесины с одной площадки увеличивается на 40,4 %, что

больше увеличения времени работы на площадке с максимальным количеством доступных деревьев.

3. Рост производительности по варианту работы с выбором мест стоянок с максимальным количеством деревьев составляет 8 % (по сравнению с 1-м вариантом) при уменьшении среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации на 20,3 и 18,8 % соответственно. На основании данных о статистическом распределении отношений производительностей для 1-го и 2-го вариантов передвижения машины при вероятности 99,6 % можно говорить об изменении производительности от снижения на 37,3 % до роста на 81,6 % относительно среднего значения 1-го варианта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азарёнок В.А. Экологизированные рубки спелых и перестойных насаждений в реализации концепции сохранения лесорастительной среды (на примере Свердловской области): автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2012. 40 с.

Azarenok V.A. *Ecologically Harvesting of Mature and Overmature Stands in the Implementation of the Concept of Conservation of Forest Ecosystems (A Case Study of Sverdlovsk Region)*: Doc. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg, 2012. 40 p. (In Russ.).

2. Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 248 с.

Baranovskiy V.A., Nekrasov R.M. *Machine Systems for Logging*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 248 p. (In Russ.).

3. Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах. Екатеринбург: УГЛУТУ, 2003. 120 с.

Gerts E.F. *Assessment of Forest Management Technology on Logging Operations*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2003. 120 p. (In Russ.).

4. Григорьев И.В., Редькин А.К., Валяжёнков В.Д., Матросов А.В. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Технология и машины лесосечных работ. СПб.: СПбГЛТА, 2010. 331 с.

Grigoryev I.V., Redkin A.K., Valyazhenkov V.D., Matrosov A.V. *Technology and Equipment of Timber Industries. Technology and Machines of Logging Operations*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2010. 331 p. (In Russ.).

5. Грушин М.А. Распознавание крон деревьев на снимках высокого разрешения // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 6. С. 149–154.

Grushin M.A. Tree Crown Recognition on High Resolution Images. *Lesnoy vestnik = Forest Bulletin*, 2012, no. 6, pp. 149–154. (In Russ.).

6. Захаров В. Системы интеллектуального управления лесных машин // ЛесПромИнформ. 2015. № 6(112). С. 72–78.

Zakharov V. Intelligent Control Systems for Forest Machines. *LesPromInform*, 2015, vol. 6, no. 112, pp. 72–78. (In Russ.).

7. Ильчуков С.В. Динамика горизонтальной структуры производных лиственных насаждений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 6. С. 29–34.

Ilichukov S.V. Dynamics of the Horizontal Structure of Derived Deciduous Plantings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2003, no. 6, pp. 29–34. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/873/873db22985ff48dfbb622e8cb66934e8.pdf>

8. Каляшов В.А. Обоснование рациональной технологии несплошных рубок при заготовке сортиментов многооперационными машинами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 20 с.

Kalyashov V.A. *Substantiation of Rational Technology of Non-Continuous Logging when Harvesting Sortings by Multi-Operation Machines*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2004. 20 p. (In Russ.).

9. Капустин В.А. Число деревьев, срезаемых с одной стоянки валочно-пакегирующей машиной // Изв. вузов. Лесн. журн. 1985. № 2. С. 32–36.

Kapustin V.A. The Number of Trees Cuttings from one Stand by a Feller-Buncher. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1985, no. 2, pp. 32–36. (In Russ.). http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5ae/32_36.pdf

10. Макаренко А.В., Редькин А.К. Влияние технологических решений на условия и эффективность работы манипуляторных лесозаготовительных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 2-С. С. 7–11.

Makarenko A.V., Redkin A.K. The Influence of Technological Solutions on the Conditions and Efficiency of Harvesters. *Lesnoy vestnik* = Forest Bulletin, 2014, no. 2-S, pp. 7–11. (In Russ.).

11. Матвейко А.П. Малоотходные и безотходные технологии в лесном хозяйстве и лесной промышленности. Минск: БГТУ, 1999. 84 с.

Matveiko A.P. *Low-Waste and Zero-Waste Technologies in Forestry and Timber Industry*. Minsk, BSTU Publ., 1999. 84 p. (In Russ.).

12. Меньшиков В.Н. Основы технологии заготовки леса с сохранением и воспроизводством природной среды. Л.: Ленингр. ун-т, 1987. 220 с.

Menshikov V.N. *Fundamentals of Forest Harvesting Technology with Preservation and Reproduction of the Natural Environment*. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1987. 220 p. (In Russ.).

13. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2019. 480 с.

Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep Learning. Dipping into the World of Neural Networks*. Saint Petersburg, Piter Publ., 2019. 480 p. (In Russ.).

14. Секретенко О.П., Грабарник П.Я. Анализ горизонтальной структуры древостоев методами случайных точечных полей // Сиб. лесн. журн. 2015. № 3. С. 32–44.

Secretenko O.P., Grabarnik P.Ya. Analysis of Tree Stand Horizontal Structure Using Random Point Field Methods. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 3, pp. 32–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150304>

15. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Sukhikh V.I. *Aerospace Methods in Forestry and Landscape Construction*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2005. 392 p. (In Russ.).

16. Шегельман И.Р., Будник П.В., Баклагин В.Н. Методика компьютерного эксперимента при определении грузоподъемности и размеров грузового отсека лесной транспортной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 160–173.

Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. Computer Experiment Technique for Determining the Load Capacity and Dimensions of the Carrying Compartment of a Forest Vehicle. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 6, pp. 160–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.160>

17. Ширнин Ю.А. Моделирование и разработка оптимальных технологических процессов лесосечных работ (для условий Волго-Вятского лесозаготовительного района): автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 42 с.

Shirnin Yu.A. *Modelling and Development of Optimal Technological Processes of Logging Operations (for Conditions of Volgo-Vyatsky Forest-Economic Region)*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1993. 42 p. (In Russ.).

18. Ширнин Ю.А., Онучин Е.М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 66–72.

Shirnin Yu.A., Onuchin E. M. Simulation of Movement of Multi-Function Logging Machine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 4, pp. 66–72. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a6c/a6c9e8eb8c696f395f0f44a8cf739672.pdf>

19. Ackerman S.A., Talbot B., Astrup R. The Effect of Tree and Harvester Size on Productivity and Harvester Investment Decisions. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 33, no. 1, pp. 22–32. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1981046>

20. Bilici E. Investigation of Feller-Buncher Performance Using Weibull Distribution. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 284. <https://doi.org/10.3390/f12030284>

21. Liski E., Jounela P., Korpunen H., Sosa A., Lindroos O., Jylhä P. Modeling the Productivity of Mechanized CTL Harvesting with Statistical Machine Learning Methods. *International Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 31, iss. 3, pp. 253–262. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1820750>

22. Makarenko A.V., Redkin A.K., Bykovsky M.A., Shadrin A.A. Using Space Images of Forest Territories for Their Statistical Analysis. *Proceedings of the AIP Conference Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration*. AIP Publishing Publ., 2019, vol. 2171, iss. 1, pp. 158–169. <https://doi.org/10.1063/1.5133252>

23. Miyajima R.H., Fenner P.T., Batistela G.C., Simões D. Technical-Economic Analysis of Grapple Saw: A Stochastic Approach. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 41, iss. 2, pp. 219–229. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.681>

24. Noordermeer L., Sørngård E., Astrup R., Næsset E., Gobakken T. Coupling a Differential Global Navigation Satellite System to a Cut-To-Length Harvester Operating System Enables Precise Positioning of Harvested Trees. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 32, no. 2, pp. 119–127. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1899686>

25. Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods. *International Journal of Forest Engineering*, 2005, vol. 16, no. 2, pp. 11–27. <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>

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



Научная статья

УДК 621.935

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-136-145

Усталостная прочность ленточных пил

Г.Ф. Прокофьев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [G-9482-2019](https://orcid.org/0000-0003-4494-4989),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4494-4989>

О.Л. Коваленко[✉], аспирант; ResearcherID: [H-1812-2019](https://orcid.org/0000-0003-1817-3949),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1817-3949>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; g.prokofjev@narfu.ru, o.kovalenko@narfu.ru[✉]

Поступила в редакцию 10.01.22 / Одобрена после рецензирования 14.05.22 / Принята к печати 18.05.22

Аннотация. Один из крупных недостатков ленточнопильных станков – низкая долговечность ленточных пил. Во время работы из-за усталостных явлений в межзубовых впадинах ленточных пил образуются трещины, которые, развиваясь, приводят к разрушению пил. Прочность ленточных пил считается обеспеченной, если коэффициент запаса прочности не менее требуемого. Рекомендовано принимать коэффициент запаса прочности равным 2. Выполнены расчеты на прочность ленточных пил с использованием схематизированной диаграммы предельных амплитуд. Выведена формула для расчета коэффициента запаса прочности ленточной пилы. По представленной формуле рассчитан коэффициент запаса прочности ленточных пил, изготовленных по ГОСТ 6532–77, которые применяются в делительных ленточнопильных станках. Полученный коэффициент запаса прочности – 1,44. Для ленточных пил данное значение является крайне низким, так как намного меньше требуемого. Для продолжительной и надежной эксплуатации ленточных пил необходима их регулярная заточка не только для обеспечения требуемой остроты зубьев, но и для обточки межзубовых впадин с целью удаления дефектного слоя, образующегося из-за усталостных явлений. Приводятся и другие рекомендации для повышения долговечности ленточных пил. Дана оценка долговечности пил ленточнопильного станка нового типа с криволинейными аэростатическими направляющими и зубьями, оснащенными твердым сплавом. Расчеты показали, что коэффициент запаса прочности в этом случае – 2,4, и возможна длительная и надежная эксплуатация такого станка без периодической обработки межзубовых впадин. Таким образом, ленточные пилы имеют низкую долговечность, вызванную их повышенным аварийным расходом. Это негативно отражается на их износостойкости, увеличивает затраты на подготовку и приобретение, поэтому полученные результаты имеют практическую ценность.

Ключевые слова: ленточная пила, усталостные трещины, коэффициент концентрации напряжений в межзубовых впадинах, коэффициент чувствительности материала ленточных пил, коэффициент запаса прочности ленточных пил



Для цитирования: Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л. Усталостная прочность ленточных пил // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 136–145. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-136-145>

Original article

Fatigue Strength of Band Saws

Gennadiy F. Prokofiev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [G-9482-2019](https://orcid.org/0000-0003-4494-4989),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4494-4989>

Oleg L. Kovalenko[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [H-1812-2019](https://orcid.org/0000-0003-1817-3949),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1817-3949>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; g.prokofjev@narfu.ru, o.kovalenko@narfu.ru[✉]

Received on January 10, 2022 / Approved after reviewing on May 14, 2022 / Accepted on May 18, 2022

Abstract. One of the major disadvantages of band saws is their low durability. Breakages during the operation are mostly caused by fractures in notches between the blades of the band as a result of the fatigue phenomenon. The strength of the band saw blades is ensured if the assurance coefficient value is greater than the theoretically determined one. The value of the assurance coefficient of 2 is recommended. A schematic limit-amplitude diagram was used to calculate the durability of band saws. A formula for the estimation of the assurance coefficient was derived. It was used for the calculation of the assurance coefficients of the band saw blades manufactured in accordance with GOST 6532–77, which are applicable in dividing band saw machines. The resulting value of the assurance coefficient was 1.44. The value is extremely low for the band saws because it is much lower than required. Band saw blades should be sharpened regularly to ensure a long and reliable service life. It should be made not only to ensure the required sharpness of the blades but also to remove the defective layers in notches caused by fatigue phenomena. In the article, there are more recommendations for improving the durability of the blades of the band saws. The durability of a new type of band saw with curved aerostatic guides and hard alloy blades was evaluated. Its assurance coefficient was 2.4. Therefore, the machine can be operated reliably for a long time without regular treatment of the notches. Consequently, band saws have low durability due to their increased breakdown rate and low wear resistance. Hence, the costs of their purchase and treatment rise. Therefore, the results presented in the article are practically applicable.

Keywords: band saw, fatigue fractures, stress concentration coefficients in notches, material sensibility coefficient of band saws, assurance coefficient of band saw blades

For citation: Prokofiev G.F., Kovalenko O.L. Fatigue Strength of Band Saws. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 136–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-136-145>

Введение

Вопросами деревообработки, в частности вопросами пиления древесины ленточными пилами, занимались многие авторы [3, 4, 7, 9, 11, 14–22].

Ленточнопильные станки нашли широкое применение в лесопилении благодаря ряду преимуществ перед другими видами лесопильных станков. Основные достоинства ленточнопильных станков следующие:

невысокая шероховатость поверхности получаемых пиломатериалов благодаря большим скоростям резания и малым подачам на зуб;

незначительный расход древесины в опилки за счет малых толщин пил;

возможность распиливать бревна больших диаметров, которые нельзя распиливать на лесопильных станках других видов;

индивидуальная распиловка бревен с учетом особенностей их строения и качества;

отсутствие массивных фундаментов, так как нет больших сил инерции при работе станка;

возможность использовать однопильные лесопильные модули в гибких автоматизированных лесопильных линиях.

Вместе с отмеченными достоинствами ленточнопильные станки имеют и ряд существенных недостатков. Одним из них является низкая долговечность ленточных пил. Аварийный расход ленточных пил наибольший по сравнению с другим лесопильным инструментом.

Эффективность пиления древесины на ленточнопильных станках в значительной степени зависит от точности пиления и от долговечности пил. Вопросы повышения точности пиления древесины рассматриваются в работах [1, 2, 5]. Данная статья посвящена вопросам долговечности ленточных пил, изготавливаемых по ГОСТ 6532–77 «Пилы ленточные для распиловки древесины. Технические условия», но основные методические положения могут быть использованы и при расчетах ленточных пил, изготовленных по ГОСТ-10670–77 «Пилы ленточные для распиловки бревен и брусьев. Технические условия».

Цель исследования – разработка рекомендаций для повышения долговечности ленточных пил для распиловки древесины.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ленточная пила, изготовленная по ГОСТ 6532–77.

Исследованиями установлено, что разрушение ленточных пил носит в основном усталостный характер [8, 16]. Прочность пилы считается обеспеченной, если коэффициент запаса прочности n не менее требуемого [6], т. е. должно быть выполнено условие $n \geq n_{\text{требуемое}}$. Величина требуемого коэффициента запаса прочности любой детали зависит от ее назначения, действующих нагрузок, характеристик материала, наличия концентраторов напряжений, технологий изготовления и подготовки к работе. В исследовании [10] с учетом перечисленного рекомендовано принимать $n = 2$. При расчете ленточных пил на прочность в [10] использована схематизированная диаграмма предельных амплитуд. На оси абсцисс откладывалась величина предела прочности, а на оси ординат – предела выносливости при симметричном цикле нагружения σ_{-1} .

Решая систему уравнений (1) и (2), получаем абсциссу точки пересечения C' этих прямых:

$$\sigma'_m = \frac{\sigma_T - \sigma_{-1}}{2 \left(1 - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} \right)}.$$

При $\sigma_m < \sigma'_m$ возможно усталостное разрушение, а при $\sigma_m > \sigma'_m$ – возникновение пластических деформаций при превышении предела текучести.

Коэффициент запаса прочности по усталостному разрушению для цикла, соответствующего точке N, определится как отношение $\frac{OK}{ON}$. Из подобия треугольников OAK и OA'N следует, что $n = \frac{OK}{ON} = \frac{OA}{OA'}$. Из рис. 1 находим

$$OA = \sigma_{-1} \text{ и } OA' = OE + EA' = \sigma_a + \sigma_m \cdot \operatorname{tg} \gamma = \sigma_a + \sigma_m \left(\frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \right).$$

Отсюда имеем

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \sigma_m \left(\frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} - 1 \right)}.$$

Для расчета коэффициента запаса прочности необходимо кроме отмеченных факторов учитывать качество заточки зубьев, которое оценивается коэффициентом $\beta = 0,6 \dots 0,9$, и эквивалентный коэффициент концентрации напряжений, определяемый согласно работе [10] по формуле:

$$k_3 = \frac{k_n \sigma_n + k_h \sigma_h}{\sigma_n + \sigma_h},$$

где k_n, k_h – коэффициенты концентрации напряжений соответственно при изгибе и натяжении.

Таким образом, коэффициент запаса прочности ленточных пил при длительной работе без обработки межзубовых впадин может быть определен по следующей формуле:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_3}{\beta} \sigma_a + \sigma_m \left(\frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Определим долговечность делительной ленточной пилы, изготовленной по ГОСТ 6532–77, имеющей толщину 1,2 мм и ширину полотна $b = 115$ мм. Диаметр пильных шкивов делительного ленточнопильного станка $D = 1250$ мм.

Пила должна быть натянута и испытывать напряжения от силы натяжения 50...100 МПа [12]. Принимаем $\sigma_n = 80$ МПа.

Напряжения от изгиба пилы на шкивах:

$$\sigma_n = \frac{S}{D} E,$$

где S – толщина пилы, мм; E – модуль упругости материала пилы, МПа, $E = 2,1 \cdot 10^5$.

При $S = 1,2$ мм, $D = 1250$ мм, $\sigma_{и} = 201,6$ МПа коэффициенты концентрации напряжений при изгибе пилы $k_{и} = 1,23$ и натяжения $k_{н} = 1,53$ приведены соответственно в работах [13] и [12]. Эквивалентный коэффициент концентрации напряжений при рекомендуемых значениях $\sigma_{и}$ и $\sigma_{н}$:

$$k_{э} = \frac{k_{и}\sigma_{и} + k_{н}\sigma_{н}}{\sigma_{и} + \sigma_{н}} = \frac{1,23 \cdot 201,6 + 1,53 \cdot 80}{201,6 + 80} = 1,32.$$

Согласно технологическим режимам РИ 04-00 «Подготовка делительных ленточных пил», допускается радиальное биение пильных шкивов делительных ленточнопильных станков 0,15 мм, что дает дополнительное натяжение пил $\Delta \sigma_{н} = \frac{\Delta L}{L} E$. При свободной длине пил $L = 2000$ мм $\Delta \sigma_{н} = \frac{0,15}{2000} 2,1 \cdot 10^5 = 15,75$ МПа.

В работе [13] приводится значение предела выносливости при симметричном цикле нагружения при изгибе полотна ленточной пилы $\sigma_{-1} = 308$ МПа и при отнулевом цикле нагружения $\sigma_0 = 498$ МПа.

Среднее напряжение цикла для наружных слоев ленточной пилы:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{и}}{2} + \sigma_{н} = \frac{201,6}{2} + 80 = 180,8 \text{ МПа.}$$

Амплитуда цикла нагружения ленточной пилы для наружных и внутренних слоев пилы:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{и}}{2} + \Delta \sigma_{н} = \frac{201,6}{2} + 15,75 = 116,55 \text{ МПа.}$$

Качество заточки зубьев, оцениваемое коэффициентом $\beta = 0,6 \dots 0,9$, характеризует шероховатость поверхности межзубовых впадин. Меньшее значение коэффициента соответствует грубой заточке. Принимаем $\beta = 0,9$.

Подставив значения σ_{-1} , $k_{э}$, β , σ_a , σ_m и σ_0 в уравнение (3), получаем коэффициент запаса прочности ленточной пилы делительного ленточнопильного станка:

$$n = \frac{308}{\frac{1,32}{0,9} 116,55 + 180,8 \left(\frac{2 \cdot 308}{498} - 1 \right)} = 1,44.$$

Для ленточных пил это крайне низкий коэффициент запаса прочности. Он значительно меньше требуемого. С целью продолжительной и надежной эксплуатации ленточных пил необходима их регулярная заточка не только для обеспечения требуемой остроты зубьев, но и для проточки межзубовых впадин с целью удаления дефектного слоя, образующегося из-за усталостных явлений. Для избежания искажения профиля зубьев необходимо выполнять регулярную правку заточного круга. При подшлифовке межзубовых впадин пальцевой фрезой обеспечивается уменьшение рисков и изменяется их направление.

Предложен новый тип ленточнопильного станка [11]. Тонкая стальная лента движется по двум криволинейным аэростатическим направляющим, расположенным над и под распиливаемым материалом. Общий вид такого станка показан на рис. 2. Подробное описание станка приведено в работе [11].

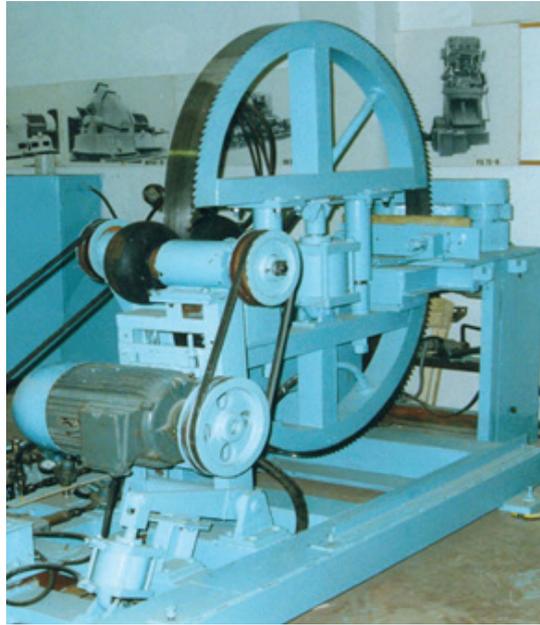


Рис. 2. Общий вид делительного ленточнопильного станка ЛСД 150
Fig. 2. General view of the LSD 150 dividing band saw

Дадим оценку долговечности ленточной пилы нового ленточнопильного станка.

Характеристика станка: ленточная пила толщиной 1,0 мм движется по криволинейным аэростатическим направляющим, имеющим ширину 100 мм. Радиус направляющих $R = 750$ мм. Сила натяжения пилы $T = 5000$ Н. Биение пилы отсутствует $\Delta\sigma_n = 0$.

Напряжение изгиба пилы

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{S}{2R} E = \frac{1,0}{2 \cdot 750} 2,1 \cdot 10^5 = 140 \text{ МПа.}$$

Напряжение натяжения пилы

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{T}{Sb} = \frac{5000}{1,0 \cdot 100} = 50 \text{ МПа.}$$

Эквивалентный коэффициент концентрации напряжений

$$k_{\text{э}} = \frac{k_{\text{и}}\sigma_{\text{и}} + k_{\text{н}}\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{н}}} = \frac{1,23 \cdot 140 + 1,53 \cdot 50}{140 + 50} = 1,3.$$

Среднее напряжение цикла

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{и}}}{2} + \sigma_{\text{н}} = \frac{140}{2} + 50 = 120 \text{ МПа.}$$

Амплитуда цикла нагружения

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{и}}}{2} = \frac{140}{2} = 70 \text{ МПа.}$$

Предел выносливости при симметричном нагружении $\sigma_{-1} = 308$ МПа. Предел выносливости при отнулевом цикле нагружения $\sigma_0 = 498$ МПа. Коэффициент, учитывающий качество обработки межзубовых впадин, принимаем $\beta = 0,9$. Подставив значения σ_{-1} , $k_{\text{э}}$, β , σ_a , σ_m и σ_0 в формулу (3), имеем $n = 2,4$.

Такой высокий коэффициент запаса прочности позволяет обеспечить длительную безаварийную работу ленточнопильного станка с пилой, оснащенной пластинками твердого сплава.

В 1991 г. на экспериментально-производственном заводе «Красный октябрь» (г. Архангельск) были проведены испытания на долговечность ленточной пилы экспериментального делительного ленточнопильного станка с криволинейными аэростатическими направляющими ЛД150-1Э [11]. Испытания выполнены на ленточной пиле, изготовленной по ГОСТ 6532–77, имеющей толщину 1,0 мм, ширину 125 мм, шаг зубьев 30 мм и длину 5500 мм. Пила подготовлена в соответствии с технологическими режимами РИ 04-00. Каждая ветвь пилы натянута с силой 6,0 кН. Скорость движения составляла 30 м/с.

Пила работала вхолостую 20 дн. по 3 ч. В процессе испытаний межзубовые впадины зубьев не обрабатывались и обследовались через каждые 3 ч. После 60 ч. испытаний на холостом ходу ни одной трещины в межзубовых впадинах не обнаружено. Во время испытаний пила претерпела $2,5 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Таким образом, результаты выполненных расчетов подтверждаются испытаниями, которые проводились ранее.

На основании проведенных расчетов и данных, полученных в ходе испытаний, можно заключить, что конструкция ленточнопильного станка с криволинейными аэростатическими направляющими значительно увеличивает долговечность пил и позволяет применять на станках такого типа ленточные пилы, оснащенные пластинками из твердых сплавов без периодической обработки межзубовых впадин. Сокращается расход пил, снижаются трудозатраты на их подготовку, повышается качество пиления древесины.

Выводы

1. Разработана математическая модель для расчета ленточных пил на долговечность.
2. Длительная работа ленточных пил делительных ленточнопильных станков традиционной конструкции с пильными шкивами возможна при частой заточке пил с проточкой межзубовых впадин и удалением дефектного слоя.
3. Тщательная подшлифовка межзубовых впадин позволяет не только уменьшить глубину рисок, но и изменяет их направление, что дает повышение долговечности ленточных пил на 40 %.
4. Применение ленточных пил для распиловки древесины в конструкции ленточнопильного станка с криволинейными аэростатическими направляющими позволяет обеспечить длительную безаварийную работу пилы при оснащении зубьев износостойкими материалами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Банников А.А. Повышение точности пиления древесины на делительных ленточнопильных станках: автореф. дис... канд. техн. наук. Архангельск, 2007. 20 с.
Bannikov A.A. *Increasing the Accuracy of Wood Sawing on Dividing Band Sawing Machines*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2007. 20 p. (In Russ.).
2. Берлин Э.П. О методах повышения устойчивости ленточных пил // Науч. тр. ЦНИИМОД. Архангельск. 1968. С. 119–123.

- Berlin E.P. On Methods to Increase Stability of Band Saw Blades. *Proceedings of TsNIMOD*. Arkhangelsk, 1968, pp. 119–123. (In Russ.).
3. Глебов И.Т. Лесопиление горизонтальными ленточнопильными станками. СПб.: Лань, 2011. 105 с.
Glebov I.T. *Lumbering with Horizontal Band Sawing Machines*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2011. 105 p. (In Russ.).
4. Глебов И.Т. Конструкции и испытания деревообрабатывающих машин. СПб.: Лань, 2012. 352 с.
Glebov I.T. *Constructions and Testing of Woodworking Machines*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2012. 352 p. (In Russ.).
5. Глебов И.Т., Вдовин А.Ю. Технологическая точность деревообрабатывающих станков. Екатеринбург: УГЛТУ, 2006. 135 с.
Glebov I.T., Vdovin A.Yu. *Technological Accuracy of Woodworking Machines*. Yekaterinburg, UGLTU Publ., 2006. 135 p. (In Russ.).
6. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Соппротивление материалов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 1969. 734 с.
Darkov A.V., Shpiro G.S. *Resistance of Materials*. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969. 734 p. (In Russ.).
7. Дербин М.В. Совершенствование аэростатических направляющих для дереворежущих пил: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 151 с.
Derbin M.V. *Improvement of Aerostatic Guides for Wood-Cutting Saws*: Cand. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2012. 151 p. (In Russ.).
8. Добрынин Е.Д. Исследование причин аварийного расхода ленточных пил // Механическая технология древесины: межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. Л., 1976. С. 45–46.
Dobrynin E.D. Research of the Reasons of Emergency Consumption of Band Saws. *Mechanical Technology of Wood: Proceedings of Interuniversity Scientific Works*. Leningrad, LTA Publ., 1976. pp. 45–46. (In Russ.).
9. Иванкин И.И. Определение основных эксплуатационных показателей делительного ленточного станка с криволинейными аэростатическими направляющими: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2001. 22 с.
Ivankin I.I. *Determination of the Main Operating Characteristics of a Dividing Tape Machine with Curvilinear Aerostatic Guides*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2001. 22 p. (In Russ.).
10. Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1992. 36 с.
Prokofiev G.F. *Intensification of Wood Sawing with Frame and Band Saws*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1992. 36 p.
11. Прокофьев Г.Ф. Создание высокотехнологичных лесопильных станков: моногр. Архангельск: СОЛТИ, 2018. 157 с.
Prokofiev G.F. *Creation of High-Technological Sawmills: A Monograph*. Arkhangelsk, JSC SOLTI Publ., 2018. 157 p. (In Russ.).
12. Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л. Определение коэффициента концентрации напряжений в межзубовых впадинах ленточной пилы при ее натяжении // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 117–123.
Prokofiev G.F., Kovalenko O.L. Determination of the Stress Concentration Factor in the Tooth Space of a Band Saw Under Tension. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2016, no. 3, pp. 117–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.117>
13. Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л., Черепанов С.А. Определение коэффициента концентрации напряжений в межзубовых впадинах ленточных пил при изгибе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 4 С. 125–136.

Prokofiev G.F. Test of Bulging Stress Concentration Factors in the Band Saw Notches. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2015, no. 4, pp. 125–136. (In Russ.). http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c56/prokofjev_test_of_bulging_stress_concentration_factors.pdf

14. Прохоров А.В., Думанский И.О. Повышение упругих и динамических характеристик натяжных устройств ленточнопильных станков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 5. С. 83–86.

Prokhorov A.V., Dumansky I.O. Increase of Elastic and Deformation Characteristics of Tensioners for Bandsaw. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 5, pp. 83–86. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/233/2338da3adc9d39e5b40fe862b8cda232.pdf>

15. Свиридов Л.Т., Максименков А.И. Ленточнопильное оборудование для лесоматериалов: моногр. Воронеж: ВГЛТА, 2004. 239 с.

Sviridov L.T., Maksimenkov A.I. *Band Sawing Equipment for Timber: A Monograph*. Voronezh, VSUFT Publ., 2004. 239 p. (In Russ.).

16. Швамм Л.Г. Исследование и разработка методов повышения долговечности ленточных пил для распиловки древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982. 20 с.

Shvamm L.G. *Research and Development of Methods to Increase Durability of Band Saw Blades for Wood Sawing: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.* Leningrad, 1982. 20 p. (In Russ.).

17. Шилько В.К. Механизмы резания ленточнопильных станков. Томск: ТГАСУ, 2005. 220 с.

Shilko V.K. *Cutting Mechanisms of Band Saw Machines*. Tomsk, TSUAB Publ., 2005. 220 p. (In Russ.).

18. Шилько В.К. Совершенствование двушкивных механизмов резания деревообрабатывающих ленточнопильных станков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2005. 40 с.

Shilko V.K. *Improvement of Double-Pulley Cutting Mechanisms for Woodworking Band Sawmills: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs.* Tomsk, 2005. 40 p. (In Russ.).

19. Якунин Н.К., Якунин И.Н. Подготовка к работе и эксплуатация ленточных пил. М.: МГУЛ, 2005. 362 с.

Yakunin N.K., Yakunin I.N. *Preparation for Work and Operation of Band Saws*. Moscow, MGUL Publ., 2005. 362 p. (In Russ.).

20. Simmonds A. *Wide Bandsaws: The Art of Saw Doctoring*. London, Stobart and Son Publ., 1980. 224 p.

21. Thunell B. Die Stabilität des Bandsägeblattes. *European Journal of Wood and Wood Products*, 1970, vol. 28, no. 9, pp. 343–348. (In German). <https://doi.org/10.1007/BF02615773>

22. Willston M. *Saws: Design, Selection, Operation, Maintenance*. San Francisco, California, Miller Freeman Publications Publ., 1978. 288 p.

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

Научная статья

УДК 621.365.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-146-154

Формирование секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы

В.И. Мелехов, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: Q-1051-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

И.И. Соловьев[✉], *канд. техн. наук*; *ResearcherID: ABE-7412-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru[✉]

Поступила в редакцию 22.04.22 / Одобрена после рецензирования 26.07.22 / Принята к печати 03.08.22

Аннотация. Эффективность работы круглопильного станка определяется работоспособностью и эксплуатационной надежностью дереворежущего инструмента. В процессе работы полотно круглой пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов. Способность пилы противодействовать возмущающим силам резания складывается из жесткости и устойчивости ее полотна. Круглая пила представляет собой тонкий стальной диск с центральным отверстием и зубчатой режущей кромкой. Диск круглой пилы имеет 3 зоны: периферийную, среднюю и центральную. Наибольшее влияние на устойчивость полотна пилы оказывают средняя и периферийная части диска. Для придания пиле работоспособности в ее полотне формируют созданием пластической деформацией граничных радиальных полосовых участков секторные зоны. В отечественной и мировой практике обработка таких участков выполняется проковкой. Нормированные напряжения в полотне круглой пилы получают локальным механическим контактным воздействием рабочего органа пилотправного инструмента по размеченным радиусам полотна пилы с формированием полосовых участков пластической деформации металла с нормально направленными к радиусу разносторонними напряжениями. При этом со стороны смежных секторов появляются контрнапряжения, приводящие к взаимному «отталкиванию» секторов и появлению напряжений сжатия, компенсирующих силы центробежного ускорения, температурного нагрева отдельных зон полотна пилы, внешних продольных и поперечных изгибающих сил, возникающих в полотне пилы при обработке древесины. Суммарное взаимодействие всех смежных секторов обеспечивает натяжение полотна пилы и устойчивость инструмента. Создание радиальных полосовых участков проковкой имеет существенные недостатки, для устранения которых предложен принципиально новый подход – формирование секторных полей остаточных напряжений в полотне пилы тепловым воздействием, заключающимся в создании нормированных остаточных термопластических напряжений в пильном полотне кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на массивы локальных радиально расположенные по полотну пилы полосовых участков. В результате проведенных исследований определены границы участков теплового воздействия на полотно пилы и диапазон температур, обеспечивающий формирование нормированных остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы при концентрированном импульсном нагреве массива радиальных полосовых участков.

Ключевые слова: круглая пила, термопластические напряжения, устойчивость, концентрированное тепловое воздействие

Для цитирования: Мелехов В.И., Соловьев И.И. Формирование секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 146–154. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-146-154>

Original article

Formation of Sectoral Residual Thermoplastic Tension Fields in Circular Saw Blade

Vladimir I. Melekhov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

Ivan I. Solovlev[✉], Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; v.melekhov@narfu.ru, i.solovlev@narfu.ru[✉]

Received on April 22, 2022 / Approved after reviewing on July 26, 2022 / Accepted on August 03, 2022

Abstract. The efficiency of a stationary circular saw is determined by the performance and operational reliability of the woodcutting unit. During operation, the circular saw blade is exposed to a variety of complex loads and thermal conditions. The rigidity and stability of the saw blade determine its capacity to resist the perturbing cutting forces. The cutting compound itself is a thin disc made of steel with a hole in the middle that has a serrated cutting edge. It consists of three areas: peripheral, middle, and central. The stability of the saw blade is determined by the middle and peripheral parts. The increase in durability is achieved by plastic deformation to form the strip boundaries of the radial sections. These parts are treated by forging in both national and international practice. Normalization of loads on the blade in case of local mechanical contact with the working body is formed in the strip boundaries of the radial sections through the formation of places with plastic deformation of the metal, which rearrange the loads and place them in the radial direction. At the same time, countertension appears from the adjoining sections, leading to mutual “repulsion” of them and the creation of compressive tension that compensates for the forces of centrifugal acceleration, thermal heating of separate areas of the saw blade, external longitudinal and transverse bending tension that arise during wood processing. The combined interaction of all adjoining sections provides the tension and stability of the saw blade. The creation of the radial sections by forging has some significant disadvantages. Their elimination requires a fundamentally new approach, such as the formation of the residual stress sections in the saw blade by thermal exposure. It creates a normalized residual thermoplastic tension in the saw blade by a short-time (1–2 s) focused thermal influence on the strip boundaries of the radial sections. The results of the conducted research determined the boundaries of the sections for thermal treatment and the temperature range, which ensure the formation of normalized residual thermoplastic tension in the circular saw blade through concentrated pulsed heating of the strip edges of radial sections.

Keywords: circular saw, thermoplastic tension, stability, focused thermal exposure

For citation: Melekhov V.I., Solovev I.I. Formation of Sectoral Residual Thermoplastic Tension Fields in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 146–154. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-146-154>

Введение

На лесопильно-деревообрабатывающих предприятиях применяют круглопильные станки, рабочим инструментом которых является круглая пила. Эффективность работы станка определяется работоспособностью и эксплуатационной надежностью дереворежущего инструмента.

В процессе работы полотно круглой пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов [4, 11, 13, 14, 16, 18, 19]. Неравномерный нагрев полотна по радиусу пилы от действия сил трения и силы сопротивления резанию вызывают деформацию пильного полотна, приводящую к возникновению внутренних напряжений, выводящих его из плоской формы упругого равновесия и снижающих работоспособность инструмента. Работоспособность пилы, сохранение ей плоской формы равновесия зависят от жесткости и устойчивости полотна пилы.

Круглая пила – тонкий стальной диск с центральным отверстием и зубчатой режущей кромкой. Принято рассматривать диск круглой пилы как состоящий из 3 зон: периферийной, средней и центральной [12–14]. На устойчивость полотна пилы в наибольшей степени влияют средняя и периферийная части диска.

В исходном состоянии полотно подготовленной круглой пилы имеет плоскую форму равновесия, которая может быть нарушена при определенном внешнем воздействии на пилу в процессе резания, что вызывает отклонение диска и режущей кромки пилы от исходного состояния, потерю устойчивости и снижение точности обработки древесины. Для придания работоспособности пиле в ее полотне формируют посредством создания граничных радиальных полосовых участков механической пластической деформацией секторные зоны. В отечественной и мировой практике обработка таких участков выполняется так называемой секторной проковкой [12–14]. Нормированные напряжения в полотне круглой пилы получают локальным механическим контактным воздействием рабочего органа пилоправного инструмента по размеченным радиусам полотна пилы. При этом формируют полосовые участки пластической деформации металла с нормально направленными к радиусу разносторонними напряжениями $\sigma_{пл.}$ (рис. 1). Как следствие, со стороны смежных секторов появляются контрнатяжения $\sigma_{кн.}$, приводящие

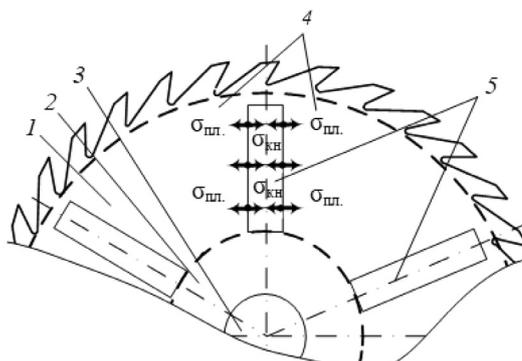


Рис. 1. Механические пластические напряжения в круглой пиле: 1 – полотно пилы; 2 – зажимной фланец; 3 – центральное отверстие; 4 – секторы; 5 – радиальные полосовые участки
Fig. 1. Mechanical plastic tension in circular saw blade: 1 – saw blade; 2 – clamping flange; 3 – central hole; 4 – sectors; 5 – radial strip sections

к взаимному «отталкиванию» секторов и созданию напряжений сжатия, компенсирующих силы центробежного ускорения, температурного нагрева отдельных зон полотна пилы, внешних продольных и поперечных изгибающих сил, возникающих в полотне при обработке древесины. Суммарное взаимодействие всех смежных секторов приводит к натяжению полотна пилы, что обеспечивает устойчивость инструмента.

Глубина следа проковки на поверхности полотна от ударов бойка проковочного инструмента достигает 0,05 мм (ГОСТ 980–80. «Пилы круглые плоские для распиловки древесины. Технические условия»), поэтому напряжения растяжения при механическом воздействии на полосовой участок возникают только в поверхностном слое, не распространяясь в глубину диска пилы, и не обеспечивают формирования равномерного поля напряжений по толщине полотна пилы [12–14]. В материале полотна между прокованными поверхностными слоями полосового участка поле напряжений остается неизменным. При дополнительном воздействии на полотно пилы, например тепловом, нарушается баланс разнонаправленных напряжений (тепловых, поверхностных и внутренних) и увеличивается риск потери плоской формы упругого равновесия диска и устойчивости пилы.

Для устранения недостатков секторной проковки предложена принципиально новая технология. Предложено формировать секторные поля остаточных напряжений в полотне пилы термопластическим воздействием, которое заключается в создании нормированных остаточных напряжений в пильном полотне кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на массив радиально расположенных по полотну пилы полосовых участков [6–8, 16]. Это обеспечит равномерное распределение напряжений в материале инструмента по всему массиву полосового участка и однородность структуры полей напряжений.

Исследований в этом направлении ранее не проводилось. Для обоснования режимов подготовки полотна пилы концентрированным тепловым воздействием на радиальные локальные полосовые участки полотна выполнены целенаправленные исследования.

Объекты и методы исследования

Рассматриваемая технология подготовки круглой пилы к работе основывается на тепловом способе [4, 6–12, 16] создания напряжений в полотне пилы импульсным индукционным нагревом радиально расположенных полосовых участков, которые являются граничными для смежных секторов полотна. При нагревании массива полосовых участков образуются поперечно расположенные по полотну пилы нормально к радиусу диска разнонаправленные тепловые напряжения $\sigma_{\text{тем}}$, превышающие предел текучести (упругости) $\sigma_{0,2}$ материала полотна. При этом в массиве участка возникают вторичные термопластические остаточные деформации [1–10, 15–17], обеспечивающие формирование в граничной зоне смежных секторов полотна пилы разносторонних остаточных термопластических напряжений $\sigma_{\text{пл}}$ (рис. 2). Под воздействием этих напряжений проявляется эффект натяжения полотна круглой пилы вследствие взаимного отталкивания смежных секторов и достигается устойчивость пилы в процессе работы.

Количественная оценка остаточных термопластических напряжений при нагревании массива радиального полосового участка и изменений полей остаточных термопластических напряжений по границе смежных секторов полотна пилы выполнена с учетом динамических и температурных напряжений, возникающих в процессе работы пилы, по математической модели, ранее рассмотренной в работах [6, 7].

Для определения зоны теплового воздействия на полотне пилы и пределов температур, вызывающих формирование остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы при импульсном индукционном нагреве радиального полосового участка смоделирован процесс формирования радиальных полосовых полей остаточных напряжений в полотне пилы. При этом приняты во внимание динамические напряжения в полотне круглой пилы, обусловленные вращением, и неравномерные температурные напряжения. Размерные характеристики пилы: диаметр – 500 мм; толщина – 2,5 мм; диаметр центрального отверстия – 50 мм; зажимной фланец – 100 мм. Материал полотна пилы – сталь 9ХФ (ГОСТ 5950–2000. «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия»). Характеристики полотна пилы: модуль упругости $E = 196,1$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,27$; плотность стали $\gamma = 7,86 \cdot 10^3$ кг/м³; предел текучести $\sigma_{0,2}$, определяемый по графику зависимости предела текучести стали от температуры, МПа; средний коэффициент линейного расширения $\alpha(t) = 11 \cdot 10^{-6}$ ед./°С.

При пилении древесины периферийная зона диска пилы нагревается больше центральной [13, 14]. Температурный градиент ΔT по радиусу диска и соответствующие радиальные и тангенциальные составляющие температурных напряжений приводят к потере баланса напряжений и плоской формы упругого равновесия диска и устойчивости пилы. Тангенциальные составляющие температурных напряжений оказывают большее влияние на устойчивость полотна пилы [10].

Для оценки характера распределения тангенциальных составляющих напряжений $\sigma_{\theta T}$ при перепаде температур по радиусу пильного диска применена функция [12, 14]:

$$\sigma_{\theta T} = \Delta T \alpha E \left[n_1 \eta_1 \left(\frac{r}{R} \right)^{n_1 - 1} + (n_1 + 1) \eta_2 \left(\frac{r}{R} \right)^{n_1} - \eta_3 \left(\frac{r}{R} \right)^{-2} + \eta_4 \right],$$

где α – коэффициент линейного расширения материала полотна пилы; $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ – функции, определяемые показателем степени n_1 в законе распределения температур [15] отношением диаметра фланца к диаметру диска пилы и отношением температур центральной и периферийной зон диска; r – текущий (рассматриваемый) радиус, м; R – радиус пилы, м.

При выполнении расчетов принято $n_1 = 3$, диаметр фланца – 100 мм, $\Delta T = 60$ °С, тогда $\eta_1 = 0,042$; $\eta_2 = -0,179$; $\eta_3 = -5,705 \cdot 10^{-3}$; $\eta_4 = 0,143$.

Расчеты выполнены с использованием программного комплекса Mathcad.

Тангенциальные составляющие динамических напряжений σ_θ , возникающих при вращении пилы во время работы, определяются из выражения [7, 12, 14]:

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma v^2}{8} \left\{ -\left(1 + 3\mu\right) \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \mu_1 c^2 - \left(\frac{r}{R}\right)^{-2} \frac{\left(\mu_1 \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \mu_2 c^2\right) \left(\mu_1 c^2 - (3 + \mu)\right)}{\mu_1 + \mu_2 c^2} \right\},$$

где γ – плотность стали; v – окружная скорость вращения пилы, м/с; $c = r_\phi / R$,

где r_ϕ – радиус зажимного фланца; μ – коэффициент Пуассона ($\mu = 0,3$; $\mu_1 = 1 + \mu$; $\mu_2 = 1 - \mu$).

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости тангенциальных составляющих температурных и динамических напряжений приведены на рис. 2.

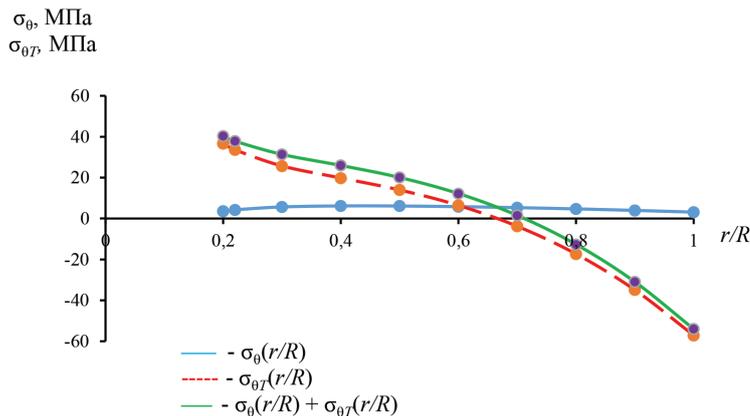


Рис. 2. Распределение тангенциальных составляющих температурных и динамических напряжений по радиусу пилы

Fig. 2. Distribution of tangential components of temperature and dynamic loads along the blade radius

Анализ зависимостей показывает, что возникающие под действием центробежных сил тангенциальные напряжения σ_θ являются растягивающими по всему радиусу пилы, а неравномерный нагрев по радиусу круглой пилы вызывает знакопеременные тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta T}$ (растяжения в средней зоне полотна и напряжения сжатия в периферийной). Точка перехода суммарных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta T} + \sigma_\theta$ растяжения в напряжения сжатия находится на относительном радиусе $r/R = 0,65$. Напряжения сжатия в периферийной зоне способствуют ослаблению зубчатой кромки, потере плоской формы упругого равновесия диска и устойчивости пилы.

Для обеспечения работоспособности пилы напряжения сжатия необходимо компенсировать, что достигается созданием соответствующих остаточных термопластических напряжений [1, 6–8].

Поле остаточных термопластических напряжений в полотне пилы формируется первоначальными тепловыми деформациями [1–5] (рис. 3).

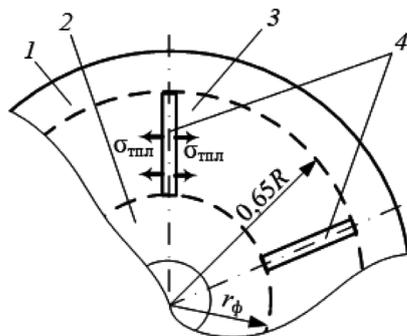


Рис. 3. Термопластические напряжения в радиальном полосовом участке: 1 – диск пилы; 2 – зажимной фланец; 3 – сектор; 4 – радиальные полосовые участки

Fig. 3. Thermoplastic loads in the radial strip section: 1 – saw blade; 2 – clamping flange; 3 – sectors; 4 – radial strip sections

При нагреве массива полосового участка до температуры t в нем возникают тепловые напряжения [1]:

$$\sigma_t(t) = -E\alpha(t)t.$$

Зависимости тепловых напряжений $\sigma_t(t)$ и предела текучести стали 9ХФ $\sigma_{0,2}(t)$ приведены на рис. 4.

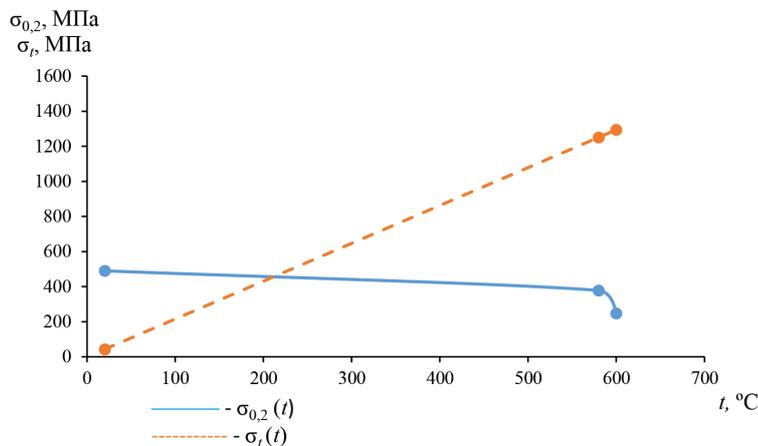


Рис. 4. Температурные напряжения и предел текучести стали 9ХФ в зависимости от температуры

Fig. 4. Temperature loads and yield strength of 9XF steel depending on temperature

Из анализа зависимостей следует, что при $t = 220$ °С и выше тепловые напряжения σ_t превышают предел текучести $\sigma_{0,2}$ стали 9ХФ. При этом тепловое воздействие вызывает остаточные термопластические напряжения на границе массива радиального полосового участка $\sigma_{\text{тпл}} \approx \sigma_{0,2}$ [1].

Из-за нагревания массива полосовых участков по радиусам пилы на участке, ограниченном окружностями зажимного фланца и радиусом $r = 0,65R$, образуются сжимающие остаточные термопластические напряжения в средней

зоне и напряжения растяжения в периферийной зоне диска. При этом сжимающие температурные напряжения в периферийной зоне от неравномерного нагрева пилы в процессе работы взаимно уравниваются и компенсируются.

Заключение

Формирование нормированных секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы концентрированным импульсным тепловым воздействием на радиальные граничные полосовые участки позволяет усовершенствовать технологию подготовки пилы, обеспечить плоскую форму упругого равновесия полотна и устойчивость круглой пилы в работе.

В результате проведенных исследований определены границы участков теплового воздействия на полотно пилы и диапазон температур, обеспечивающий формирование нормированных остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы при концентрированном импульсном нагреве массива радиальных полосовых участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
Birger I.A. *Residual Tensions*. Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo «Mashinostroyeniye» Publ., 1963. 232 p. (In Russ.).
2. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
Bogatov A.A. *Mechanical Properties and Models of Metal Destruction*. Yekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2002. 329 p. (In Russ.).
3. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. Уральская научно-педагогическая школа им. проф. А.Ф. Головина, Екатеринбург, 29 окт.–1 нояб. 2012 г. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2013. С. 95–101.
Bogatov A.A. Residual Tensions and Metal Destruction. *Innovative Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering: Proceedings of the 6th International Scientific-Practical Conference of Ural Scientific-Pedagogical School named after Professor A.F. Golovin, Yekaterinburg, 29 October – 1 November 2012*. Yekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2013, pp. 95–101. (In Russ.).
4. Боровиков Е.М., Орлов Б.Ф. Термический способ подготовки круглых пил к работе // Изв. вузов. Лесн. журн. 1974. № 6. С. 90–94.
Borovikov E.M., Orlov B.F. Thermal Treatment of Circular Saws. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1974, no. 6, pp. 90–94. (In Russ.).
5. Бородин И.Н., Майер А.Е., Петров Ю.В., Груздков А.А. Максимум предела текучести при квазистатической и высокоскоростной пластической деформации металлов // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, вып. 12. С. 2384–2393.
Borodin I.N., Mayer A.E., Petrov Yu.V., Gruzdkov A.A. Maximum Yield Strength Under Quasi-Static and High-Speed Plastic Deformation of Metals. *Solid State Physics*, 2014, vol. 56, no. 12, pp. 2384–2393. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1063783414120051>
6. Мелехов В.И., Соловьев И.И. Создание термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 87–91.
Melekhov V.I., Solovyov I.I. Creation of Thermoplastic Tension in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2010, no. 2, pp. 87–91. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b08/b087c4466253da22ed3e19c778437576.pdf>

7. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Тюрникова Т.В., Пономарева Н.Г. Повышение устойчивости дереворежущих пил термопластическим воздействием на распределение остаточных напряжений в полотне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 172–181.

Melekhov V.I., Solovyev I.I., Tyurikova T.V., Ponomareva N.G. Improving the Stability of Wood-Cutting Saws by Thermoplastic Action on the Distribution of Residual Stresses in The Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 6, pp. 172–181. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-172-181>

8. Патент 2434952 С1 РФ, МПК С21D 9/24, Н05В 6/02. Устройство для создания термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы: № 2010117098/02: заявл. 29.04.2010; опубл. 27.11.2011 / И.И. Соловьев, В.И. Мелехов.

Melekhov V.I., Solovyev I.I. *Device for Creating Thermoplastic Stresses in Circular Saw Blade*. Patent RF no. RU 2434952 C1, 2011. (In Russ.).

9. Патент 2684521 С1 РФ, МПК С21D 9/24. Устройство для создания термопластических нормированных напряжений в круглой пиле: № 2018121970: заявл. 15.06.2018; опубл. 09.04.2019 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев.

Melekhov V.I., Solovyev I.I. *Device for Creation Thermoplastic Normalized Stresses in Circular Saw Blade*. Patent RF no. RU 2684521 C1, 2019. (In Russ.).

10. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения: моногр. М.: Наука, 1982. 109 с.

Pozdeyev A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Residual Stresses: Theory and Applications: A Monograph*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 109 p. (In Russ.).

11. Прокофьев Г.Ф. Создание высокотехнологичных лесопильных станков: моногр. Архангельск, 2018. 157 с.

Prokofiev G.F. *Creation of High-Tech Sawmills: A Monograph*. Arkhangelsk, Solti Publ., 2018. 157 p. (In Russ.).

12. Стахив Ю.М. Устойчивость и колебания плоских круглых пил. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 296 с.

Stakhiyev Yu.M. *Stability and Vibration of Flat Circular Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 296 p. (In Russ.).

13. Стахив Ю.М. Научно-технологические основы производства, подготовки и эксплуатации плоских круглых пил для распиловки древесины: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2002. 32 с.

Stakhiyev Yu.M. *Scientific and Technological Bases of Production, Setting-Up and Operation of Flat Circular Saws for Wood Sawing: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs.* Arkhangelsk, 2002. 32 p. (In Russ.).

14. Якунин Н.К. Подготовка круглых пил к работе. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 151 с.

Akunin N.K. *Setting-Up of Circular Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 151 p. (In Russ.).

15. Bathe K.J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. New Jersey, Prentice Hall Publ., 1982. 735 p.

16. Bayer R.J. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing, Revised and Expanded*. New York, CRC Press Publ., 2004. 416 p. <https://doi.org/10.1201/9780203021798>

17. Calladine C.R. *Theory of Shell Structures*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1983. 763 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278>

18. Hughes T.J.R., Hinton E. *Finite Element Methods for Plates and Shells: Elements Technology*. Vol. 1. Swansea, Pineridge Press Publ., 1986. 315 p.

19. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 2009. 856 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810947>

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 006.82

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-155-168

Получение биокompозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы с различной степенью ацетилирования

А.Е. Шкуро[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [A-2772-2014](https://orcid.org/0000-0002-0469-2601),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>

В.В. Глухих, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-2418-2014](https://orcid.org/0000-0001-6120-1867),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6120-1867>

К.А. Усова, инж.-исследователь; ResearcherID: [GOJ-9248-2022](https://orcid.org/0000-0002-6237-955X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6237-955X>

Д.Д. Чирков, инж.-исследователь; ResearcherID: [GOJ-9173-2022](https://orcid.org/0000-0002-8027-1753),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8027-1753>

П.С. Захаров, аспирант; ResearcherID: [GOJ-9111-2022](https://orcid.org/0000-0003-4016-2269),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>

А.В. Вураско, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; shkuroae@m.usfeu.ru[✉], gluhihvv@m.usfeu.ru, usovaka@m.usfeu.ru, chirkovdd@m.usfeu.ru, zaharovps@m.usfeu.ru, vurasko2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.08.22 / Одобрена после рецензирования 02.11.22 / Принята к печати 05.11.22

Аннотация. С ростом цен на синтетические термопластичные полимеры, получаемые из нефтяного и газового сырья, ожидается увеличение объемов практического применения древесно-полимерных композитов природных возобновляемых полимеров и их производных (биокompозитов). Необходимость замены в композиционных материалах таких синтетических полимеров, как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и других, связана и с их экологической опасностью в связи с низкой степенью разложения в природных средах (грунте, воде, воздухе). Дополнительной проблемой для производителей древесно-полимерных композитов являются требования законодательных актов организации самостоятельного обезвреживания всех отходов производства. Одними из перспективных материалов для практического применения в производстве древесно-полимерных композитов являются связующие на основе пластифицированных ацетатов целлюлозы. Отечественными и зарубежными учеными изучено влияние степени ацетилирования ацетатов целлюлозы на свойства полимерных материалов без лигноцеллюлозных наполнителей. Нет сведений об использовании для получения древесно-полимерных композитов отходов ацетатов целлюлозы. В данной статье представлены результаты исследования по получению горячим прессованием

биокомпозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы различной степени ацетилирования и наполнителями: древесной мукой и отходами ацетатной фотопленки. Разработаны адекватные для доверительной вероятности более 0,9 экспериментально-статистические зависимости влияния степени ацетилирования ацетатов целлюлозы и содержания наполнителей в биокомпозитах на их свойства: разложение в активированном грунте, водопоглощение, прочность при изгибе, твердость по Бригеллю и др. По некоторым показателям полученные биокомпозиты не уступают эталонному древесно-полимерному композиту с фазой полиэтилена высокой плотности с содержанием древесной муки 50 %. Выведенные зависимости позволяют прогнозировать изменения свойств биокомпозитов при разных степенях ацетилирования пластифицированного ацетата целлюлозы и содержания в них наполнителя, а также решать задачи по выбору оптимального химического состава древесно-полимерного композита для изготовления методом горячего прессования конкретного изделия.

Ключевые слова: композиты, биокомпозиты, ацетаты целлюлозы, древесная мука, отходы ацетатной пленки, свойства биокомпозитов, экспериментально-статистические модели свойств

Благодарности: Авторы благодарны Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за финансовую поддержку в рамках научного проекта «FEUG-2020-0013».

Для цитирования: Шкуро А.Е., Глухих В.В., Усова К.А., Чирков Д.Д., Захаров П.С., Вураско А.В. Получение биокомпозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы с различной степенью ацетилирования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 155–168. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-155-168>

Original article

Deriving Biocomposites of Polymer Phase Plasticised Cellulose Acetates with Varying Degrees of Acetylation

Aleksey E. Shkuro[✉], Candidate of Engineering., Assoc. Prof.;

ResearcherID: [A-2772-2014](https://orcid.org/0000-0002-0469-2601), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>

Victor V. Glukhikh, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-2418-2014](https://orcid.org/0000-0001-6120-1867),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6120-1867>

Kristina A. Usova, Research Engineer; ResearcherID: [GOJ-9248-2022](https://orcid.org/0000-0002-6237-955X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6237-955X>

Denis D. Chirkov, Research Engineer; ResearcherID: [GOJ-9173-2022](https://orcid.org/0000-0002-8027-1753),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8027-1753>

Pavel S. Zakharov, Postgraduate Student; ResearcherID: [GOJ-9111-2022](https://orcid.org/0000-0003-4016-2269),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>

Alesya V. Vurasko, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

Urals State Forest Engineering University, ul. Sibirsky Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; shkuroae@m.usfeu.ru[✉], gluhihvv@m.usfeu.ru, usovaka@m.usfeu.ru, chirkovdd@m.usfeu.ru, zaharovps@m.usfeu.ru, vurasko2010@yandex.ru

Received on August 23, 2022 / Approved after reviewing on November 02, 2022 / Accepted on November 05, 2022



Abstract. It is anticipated that the creation of wood-polymer composites (WPC) made of naturally renewable polymers and their derivatives (biocomposites) would have a significant practical use due to the rise in prices for synthetic thermoplastic polymers derived from oil and gas. Furthermore, the necessity to replace synthetic polymers such as polyethylene, polypropylene, polyvinyl chloride, and others as components of composite materials is also associated with environmental hazards caused by their low degradation rate in the natural media (soil, water, and air). A further problem for manufacturers of WPC is the legislative requirement for autonomous neutralisation of production waste. One of the potential materials for practical application in the production of WPC are binders based on plasticised cellulose acetates. Russian and foreign scientists have studied the influence of the degree of acetylation of cellulose acetate on the properties of polymeric materials that do not contain lignocellulose fillers. There is no information found concerning the secondary use of cellulose acetate waste for the production of WPC. This article presents the results of an investigation into the hot pressing of biocomposites with a polymer phase of plasticised cellulose acetates of varying degrees of acetylation and fillers: wood flour and waste acetate photographic film. An experimental and statistical dependence of the effect of the degree of acetylation of cellulose acetate and filler content in the biocomposite on its properties was developed, sufficient to exceed a confidence level of 0.9. The experimental specifications included decomposition in activated soil, water absorption, bending strength, Brinell hardness, etc. Some test results showed that the derived biocomposites have the same level of properties as the reference WPC, which consists of a high-density polyethylene phase with a wood flour content of 50 %. The derived dependencies allow us to predict changes in the properties of biocomposites at different degrees of acetylation of plasticised cellulose acetate and filler content. Moreover, they solve the problem of choosing the optimal chemical combination for WPC for manufacturing a specific product by hot pressing.

Keywords: composites, cellulose acetates, wood flour, acetate film waste, properties, experimental-statistical models of properties

Acknowledgments: the authors are grateful to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for financial support in the framework of the scientific project FEUG-2020-0013.

For citation: Shkuro A.E., Glukhikh V.V., Usova K.A., Chirkov D.D., Zakharov P.S., Vurasko A.V. Deriving Biocomposites of Polymer Phase Plasticised Cellulose Acetates with Varying Degrees of Acetylation. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 155–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-155-168>

Введение

Прогнозируют [7, 11, 12, 14, 15, 17, 19], исходя из анализа экономической и экологической ситуации, рост производства изделий из композиционных материалов с полимерными связующими, полученными на основе природных термопластичных полимеров и их производных (биокомпозитов), для применения в медицине, при водоочистке, в теплоэнергетике, для упаковки, в аэрокосмической промышленности, для автомобильных конструкционных деталей, строительных материалов и мебели.

В зависимости от области использования биокомпозитов существуют противоположные требования к скорости их разложения под воздействием окружающей среды. Так, например, для применения в строительстве материалы и изделия, непосредственно контактирующие с грунтом, водой, микроорганизмами, солнечным светом, должны иметь минимальную скорость

разложения. Для материалов и изделий, применяемых в качестве одноразовой упаковки, требуются необходимый потенциал разложения и заданная скорость разложения в грунте, воде, компостной среде. В связи с ужесточением в России и ряде стран законодательства в области экологической безопасности отходов производства и потребления продукции возникает спрос на изделия из полимерных композиционных материалов с конкретными скоростью разложения в различных средах и показателями физико-механических свойств.

В настоящее время в больших объемах производят различную продукцию с использованием термопластичных производных целлюлозы, в том числе ацетатов целлюлозы (АЦ). АЦ применяют как основные компоненты материалов для изготовления фильтров, мембран, пленок, текстиля, пластика.

Установлено влияние степени ацетилирования АЦ на их физико-механические свойства и способность к биоразложению [4, 7, 13, 19, 21]. Замена гидроксильных групп целлюлозы на ацетильные изменяет термические, химические, физические и механические характеристики полимера, его способность к разложению [1, 13–16, 20]. Известно, что целлюлоза нерастворима в большинстве традиционных растворителей [9]. Диацетат целлюлозы растворим в ацетоне или тетрагидрофуране, а триацетат целлюлозы – в дихлорметане и других хлорсодержащих растворителях [8].

Согласно [10], физико-механические свойства целлюлозы и ее производных во многом зависят от их молекулярной, надмолекулярной и морфологической структуры. Перспективным методом изучения морфологии производных целлюлозы является сканирующая электронная микроскопия. Так, с ее помощью установили [5], что снижение степени ацетилирования АЦ приводит к росту количества фибрилл в структуре материала. Образцы с более низкими степенями ацетилирования имеют структуру, похожую на структуру целлюлозы. Образцы АЦ с более высокими степенями ацетилирования характеризуются меньшим фибриллированием поверхности с тенденцией к образованию поверхностей губчатого типа. Авторы также отмечают, что степень кристалличности АЦ снижается пропорционально росту степени ацетилирования.

В работах [18, 21] представлены результаты исследования разных свойств пластифицированных АЦ и условий их разложения в различных средах и по различным методикам, что затрудняет сравнение полученных данных. В [13] предложен механизм биodeградации АЦ с разными степенями ацетилирования. Авторы отмечают, что разложение (деполимеризация) АЦ грибами возможно только при достижении определенной степени ацетилирования (не более 2,0), снижающейся под действием эстераз, группы ферментов, катализирующих гидролитическое расщепление сложных эфиров. При этом для АЦ со степенью ацетилирования выше 2,5 действие эстераз оказывается заблокировано стерическими преградами, образованными ацетильными группами. Таким образом, АЦ с высокими степенями ацетилирования оказываются защищены от биоразложения на уровне синтетических термопластичных полимеров.

В обзоре [9] приведены результаты работ по изучению влияния степени ацетилирования на способность АЦ к биodeградации под воздействием

микроорганизмов. Отмечены различные характер и степень биоразложения АЦ в грунте в зависимости от видов микроорганизмов и других параметров грунта. Авторы [21] считают, что при изучении биоразложения материалов в грунте по потере массы происходит оценка их разложения не только под действием микроорганизмов, но и других процессов, связанных с условиями окружающей среды. Поэтому по данной методике оценивают общую деградацию материалов. В работе [6] сказано о важной роли относительной влажности, температуры, содержания и диффузии пластификатора в воду на процессы разложения пластифицированных АЦ.

Получение АЦ и влияние степени их ацетилирования на свойства композиционных материалов с учетом их полимерной фазы и входящих в состав лигноцеллюлозных наполнителей изучены мало. В ранее выполненных исследованиях рассмотрены свойства различных композиционных материалов только на основе диацетатов и триацетатов целлюлозы с неопределенной степенью ацетилирования [1–3].

В число актуальных современных задач включают обезвреживание промышленных отходов, вышедших из потребления продуктов, содержащих АЦ. Одним из наиболее распространенных видов таких отходов являются ацетатные пленки (ОАП).

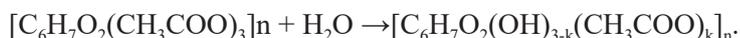
Цель работы – получение методом горячего прессования биокomпозитов с полимерной фазой в виде пластифицированных АЦ и наполнителями (древесной мукой (ДМ), ОАП), а также определение закономерностей влияния химического строения и компонентного состава биокomпозитов на их способность к разложению в активированном грунте и физико-химические свойства. В задачи исследования входило выведение и анализ экспериментально-статистических зависимостей для свойств компонентов полученных биокomпозитов и оценка их потенциала для практического применения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стали биокomпозиты в форме дисков толщиной 5 мм и диаметром 90 мм, полученные в лабораторных условиях горячим прессованием в пресс-форме при температуре плит пресса 180 °С и выдержке при максимальном давлении 10 МПа в течении 15 мин с последующим охлаждением до температуры 60 °С. Дополнительными объектами были листы, сформированные из механической смеси компонентов биокomпозитов на лабораторных вальцах при температуре вальцевания 150–160 °С, а также вырезанные из полученных дисков образцы биокomпозитов с требуемыми размерами.

В качестве исходного сырья для биокomпозитов использовали: АЦ со степенью ацетилирования 2,41, произведенный ОАО «Ацетат Химволокно» по требованиям ТУ 6-05-943–75; триацетат глицерина (триацетин); дибутиловый эфир фталевой кислоты (дибутилфталат); трибутилфосфат; стеарат кальция; ДМ хвойных пород древесины марки 180, произведенную ООО «Юнайт» по требованиям ГОСТ 16361–87; ОАП, предоставленные Союзом отходообрабатывающих предприятий Уральского федерального округа. Отходы пленки измельчали с помощью высокоскоростной лабораторной мельницы до диаметра частиц не более 0,7 мм.

Образцы АЦ с различной степенью ацетилирования (k) получены щелочным гидролизом триацетата целлюлозы:



Реакцию гидролиза проводили следующим образом. К 15 г измельченного АЦ добавляли 300 мл воды и 315 мл 0,5 н. раствора гидроксида натрия при температуре $20 \pm 0,5$ °С при постоянном перемешивании. Для дальнейшего исследования отбирали пробы через 1, 3, 5 и 10 мин. Изменение химического состава образцов АЦ в процессе щелочного гидролиза подтверждено данными ИК-спектроскопии.

Для полученных композитов определяли твердость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии, пластичность по ГОСТ 4670–67, прочность при изгибе по ГОСТ 17036–71 и водопоглощение по ГОСТ 19592.

Для изучения способности композитов к биоразложению был использован активированный грунт, полученный по следующей рецептуре: 89 об. % садового грунта (ГОСТ Р 53381–2009), 1 об. % микробиологического препарата «Тамир» (ТУ 9291-002-70213832–2007) и 10 об. % дистиллированной воды. В составе препарата «Тамир» присутствуют бактерии *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*, *Saccaromyces cerevisiae*, сапрофитные микроорганизмы, ферменты и биологически активные вещества, способствующие разложению органических соединений. Степень разложения образцов оценивали по величине потери массы после экспонирования в активированном грунте. Предварительно взвешенные образцы биокомпозитов в виде пластин размером 15×10 мм помещали в емкость с активированным грунтом на глубину 2–3 см в горизонтальном положении. После окончания срока экспонирования образцы извлекали из грунта, очищали этиловым спиртом и сушили в течение суток при температуре 105 °С.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения экспериментов необходимо было подобрать универсальный состав пластификаторов, способный обеспечивать достаточную текучесть смеси АЦ с пластификаторами для соединения пластифицированных АЦ с наполнителями биокомпозитов при использовании метода вальцевания. Критерием выбора состава смеси пластификаторов стал показатель текучести расплава (ПТР) пластифицированных АЦ не ниже 0,05 г/мин при нагрузке 5 кгс и температуре 190 °С.

В результате определения ПТР пластифицированных АЦ для дальнейших экспериментов было выбрано следующее постоянное соотношение компонентов полимерного связующего биокомпозитов: 62 мас. ч. АЦ, 30 мас. ч. триацетина, 8 мас. ч. трибутилфосфата. В табл. 1 приведены результаты определения ПТР пластифицированных АЦ с данным массовым соотношением АЦ и пластификаторов.

Для оценки влияния степени ацетилирования целлюлозы на свойства биокомпозита на основе пластифицированного АЦ и ДМ был выполнен эксперимент, в котором для каждой из степеней ацетилирования: 2,41; 2,29; 2,19; 2,07; 1,81 – количество ДМ брали 0; 11,1; 42,9 и 100,0 мас. ч. В этом эксперименте варьировали долю ДМ в составе композита в диапазоне 0–50 %.

Таблица 1

**Показатель текучести расплава образцов пластифицированных АЦ
с различными степенями ацетиляции**

**Fluidity indicator of melting samples of plasticised cellulose acetates
with different degrees of acetylation**

Входной фактор	Числовое значение фактора				
Степень ацетиляции	2,41	2,29	2,19	2,07	1,81
ПТР, г/ мин	32,9	8,9	3,4	2,1	0,7

Для полученных образцов дисков определены следующие показатели их свойств: плотность, твердость по Бринеллю, пластичность, модуль упругости при сжатии, ударная вязкость, прочность при изгибе, водопоглощение за сутки и 30 сут., степень разложения при выдержке в активированном грунте в течение 90 и 120 сут.

По данным регрессионного анализа для максимального значения доверительной вероятности (но не менее 0,9) были установлены следующие адекватные экспериментально-статистические зависимости влияния степени ацетиляции АЦ и содержания ДМ на 100 мас. ч. пластифицированного АЦ (Z_1 , мас. ч.) в полученных образцах биокompозитов на их свойства с коэффициентом множественной корреляции R :

плотность, кг/м³:

$$1206 + 0,2636k \cdot Z_1 (R = 0,45);$$

твердость по Бринеллю, МПа:

$$23,9k + 0,619Z_1 (R = 0,92);$$

пластичность, %:

$$40,9k - 0,391Z_1 - 12,6k^2 + 0,00293Z_1^2 (R = 0,89);$$

модуль упругости при сжатии, МПа:

$$226,8k + 8,386Z_1 (R = 0,91);$$

ударная вязкость, кДж/м²:

$$15,5k - 0,1093Z_1 - 3,7k^2 (R = 0,88);$$

прочность при изгибе, МПа:

$$25,8k - 0,0961Z_1 (R = 0,92);$$

водопоглощение за сутки, мас. %:

$$109,5 - 100,1k + 0,5269Z_1 - 0,215k \cdot Z_1 + 23,2k^2 (R = 0,85);$$

водопоглощение за 30 сут., мас. %:

$$24,4 - 8,9k + 0,177Z_1 (R = 0,94);$$

потеря массы при выдержке в активированном грунте в течение 90 сут., %:

$$23,0 - 6,7k - 0,062k \cdot Z_1 + 0,00133Z_1^2 (R = 0,55);$$

потеря массы при выдержке в активированном грунте в течение 120 сут., %:

$$26,1 - 7,4k - 0,074k \cdot Z_1 + 0,0016Z_1^2 (R = 0,58).$$

Изменение величин исследованных входных факторов (степени ацетиляции АЦ и содержания в биокompозитах ДМ) отражается на всех свойствах полученных композитов.

Плотность биокompозитов возрастает пропорционально увеличению значений обоих входных факторов.

На степень разложения полученных биокomпозитов в активированном грунте наибольшее влияние оказывает изменение степени ацетилирования АЦ. Ее повышение приводит к уменьшению степени разложения биокomпозитов (рис. 1). Влияние на это свойство содержания в полученных биокomпозитах ДМ имеет экстремальный характер: при невысоких степенях наполнения способность материала к биоразложению в грунте снижается, достигая минимума при содержании ДМ порядка 50 мас. ч.; при дальнейшем увеличении количества ДМ способность материала к разложению в активированном грунте возрастает.

Повышение степени ацетилирования АЦ уменьшает также водопоглощение полученных биокomпозитов (рис. 2), но существенно увеличивает их модуль упругости при сжатии и прочность при изгибе (рис. 3).

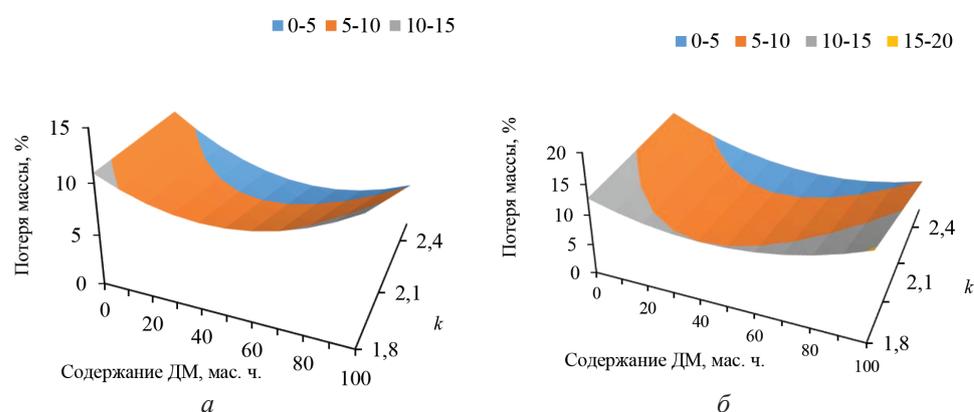


Рис. 1. Зависимость разложения биокomпозитов от содержания в них древесной муки и степени ацетилирования АЦ при выдержке в активированном грунте: *a* – 90 сут.; *б* – 120 сут.

Fig. 1. Dependence of degradation of biocomposites on the content of wood flour and the degree of acetylation of cellulose acetates when held in activated soil: *a* – for 90 days; *б* – for 120 days

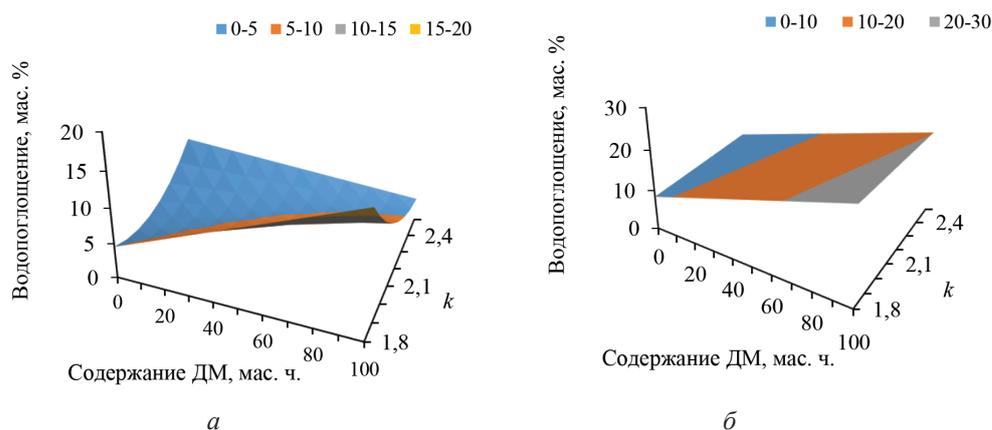


Рис. 2. Зависимость водопоглощения биокomпозитов от содержания в них древесной муки и степени ацетилирования АЦ: *a* – за 1 сут.; *б* – за 30 сут.

Fig. 2. Dependence of water absorption of biocomposites on the content of wood flour and the degree of acetylation of cellulose acetates: *a* – for 1 day; *б* – for 30 days

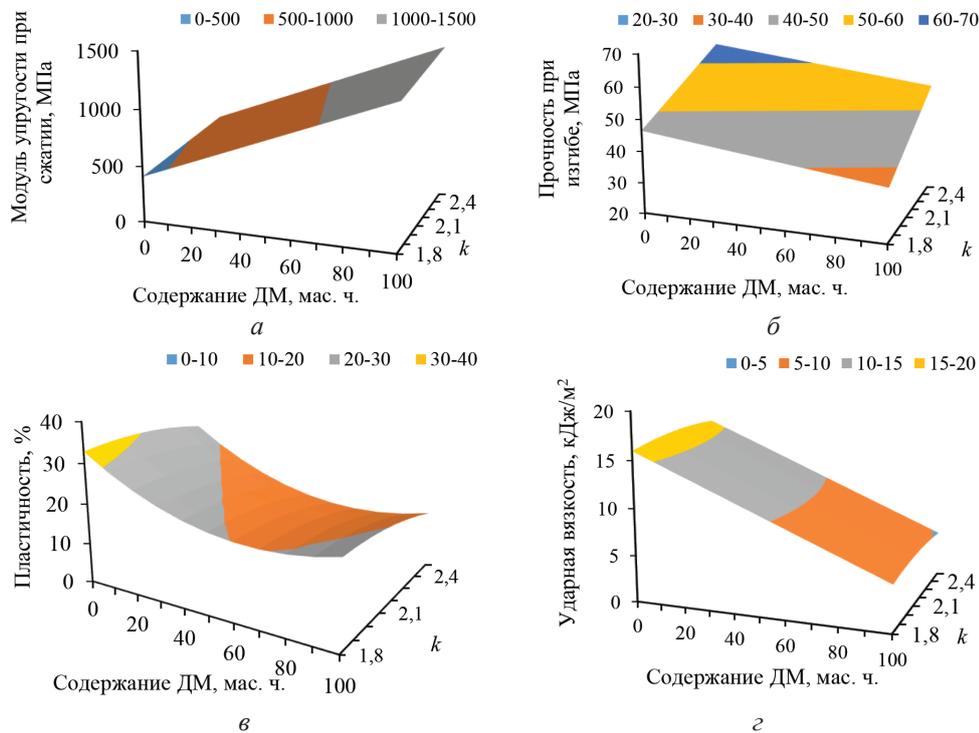


Рис. 3. Зависимость показателей свойств биокomпозитов от содержания в них ДМ и степени ацетилирования АЦ: *a* – модуль упругости при сжатии; *б* – прочность при изгибе; *в* – пластичность; *з* – ударная вязкость

Fig. 3. Dependence of the properties of biocomposites on the content of wood flour in them and the degree of cellulose acetates acetylation: *a* – modulus of elasticity at compression; *б* – flexural rigidity; *в* – ductility; *з* – impact strength

Рост показателей физико-механических свойств биокomпозитов при этом обусловлен снижением интенсивности образования водородных связей между макромолекулами АЦ в образцах с более высокими степенями ацетилирования, что, в свою очередь, позволяет получать биокomпозиты с более равномерным распределением наполнителя в полимерной фазе АЦ. Увеличение содержания в композиции ДМ повышает модуль упругости при сжатии, но уменьшает прочность при изгибе, пластичность и ударную вязкость биокomпозита (рис. 4).

По показателям ударной вязкости и прочности при изгибе полученные биокomпозиты во всем исследованном диапазоне степени ацетилирования пластифицированного АЦ и содержания ДМ существенно превосходят эталонный древесно-полимерный композит с фазой полиэтилена высокой плотности с содержанием древесной муки 50 %, у которого значения этих показателей соответственно равны 3,5 кДж/м² и 40,3 МПа.

Для изучения возможности совместного использования ДМ и ОАП в качестве наполнителей для пластифицированного триацетата целлюлозы ($k = 2,41$) были получены горячим прессованием образцы биокomпозитов в форме дисков, рецептуры представлены в табл. 2. При приготовлении смеси всех компонентов биокomпозитов вальцеванием массовое соотношение между триацетатом целлюлозы и пластификаторами (триацетином и трибутилфосфатом)

не меняли – 667 : 266 : 67 мас. ч. Содержание в композите ДМ варьировали от 0,9 до 29,1 %, ОАП – от 0,9 до 29,1 %, а содержание лубриканта (стеарата кальция) было постоянным – 1,5 %.

Таблица 2

Состав полученных образцов биокompозитов
The composition of the obtained samples of biocomposites

Компонент	Содержание компонента, мас. ч.									
	ДМ	21,9	51,5	36,5	1,0	53,5	27,6	21,9	7,3	18,2
ОАП	21,9	51,5	7,3	5,3	27,6	53,5	21,9	36,5	1,1	18,2

Примечание: Содержание пластифицированного АЦ для всех случаев было равно 100 мас. ч.

По данным регрессионного анализа для максимального значения доверительной вероятности (но не менее 0,9) установлены следующие адекватные экспериментально-статистические зависимости свойств биокompозитов от содержания в них (по отношению к содержанию пластифицированного триацетата целлюлозы) ДМ (Z_1) и ОАП (Z_2) со значениями коэффициента множественной корреляции R :

плотность, кг/м³:

$$1194 - 1,661Z_2 + 0,09659Z_1 \cdot Z_2 - 0588 Z_1^2 (R = 0,86);$$

твёрдость по Бринеллю, МПа:

$$53,6 + 0,018Z_1 \cdot Z_2 (R = 0,69);$$

пластичность, %:

$$30,8 - 0,01344Z_1 \cdot Z_2 + 0,01507Z_1^2 (R = 0,93);$$

прочность при изгибе, МПа:

$$49,6 + 0,3043Z_1 \cdot Z_2 - 0,02138Z_1^2 - 0,01656Z_2^2 (R = 0,93);$$

водопоглощение за сутки, мас. %:

$$1,6 - 0,00619Z_1 \cdot Z_2 + 0,00507Z_1^2 + 0,00252 Z_2^2 (R = 0,95);$$

водопоглощение за 30 сут., мас. %:

$$4,4 + 0,231Z_1 - 0,01171Z_1 \cdot Z_2 + 0,006093 Z_1^2 + 0,004381Z_2^2 (R = 0,99);$$

потеря массы при выдержке в активированном грунте в течение 90 сут., %:

$$5,6 + 0,003114Z_1^2 (R = 0,90).$$

Из данных зависимостей следует, что присутствие в составе биокompозита ОАП статистически значимо влияет на перечисленные свойства биокompозитов с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы в исследованном диапазоне изменений содержаний в них наполнителей.

На степень разложения биокompозитов при их выдержке в активированном грунте в течение 90 сут. воздействует только содержание ДМ в отличие от композитов с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы, наполненных ДМ (рис. 1). Оценивая способности к разложению биокompозитов в активированном грунте, следует отметить, что степень разложения композитов, наполненных смесью ДМ с ОАП, растёт с увеличением содержания ДМ и существенно больше по сравнению с биокompозитами, наполненными только ДМ (рис. 4).

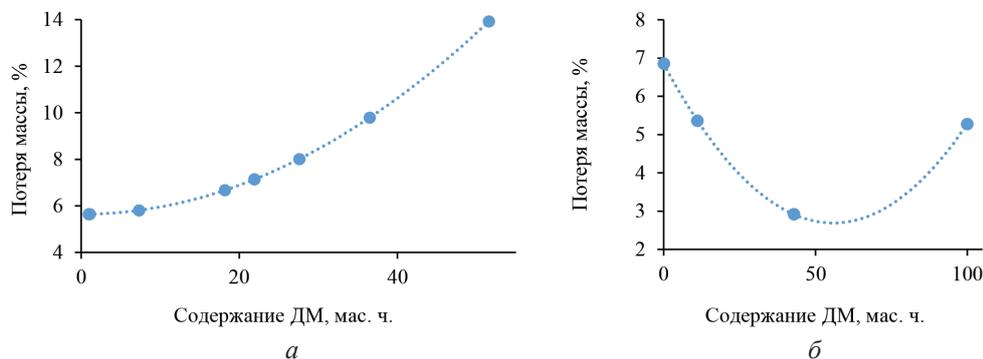


Рис. 4. Зависимость разложение биокomпозитов с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы при выдержке в активированном грунте в течение 90 сут. от содержания ДМ: *a* – композит, наполненный смесью ДМ и ОАП; *б* – композит, наполненный ДМ

Fig. 4. Dependence of the decomposition of biocomposites with a polymeric phase of plasticised cellulose triacetate upon exposure in activated soil for 90 days on the content of wood flour in them: *a* – composite with a mixture of wood flour and acetate films; *б* – composite with wood flour

На водопоглощение и пластичность биокomпозитов оказывает влияние доля обоих компонентов наполнителя относительно полимерной фазы пластифицированного АЦ (рис. 5). При минимальном содержании в смеси наполнителей ДМ происходит рост водопоглощения и пластичности композитов с увеличением в них доли ОАП, а при максимальном (≈ 50 мас. ч. относительно пластифицированного АЦ) – наблюдается экстремальный характер влияния доли ОАП на эти свойства.

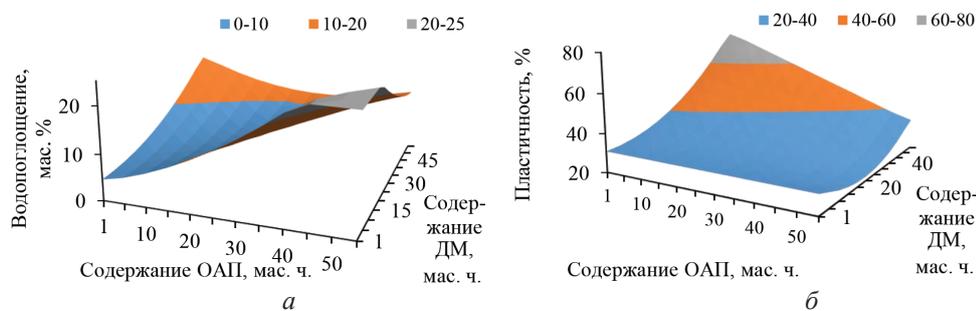


Рис. 5. Зависимости влияния содержания наполнителей в биокomпозитах с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы на их водопоглощение за 30 сут. (*a*) и пластичность (*б*)

Fig. 5. Dependences of the influence of the content of fillers in biocomposites with a polymeric phase of plasticised cellulose triacetate on their water absorption for 30 days (*a*) and ductility (*б*)

Противоположные эффекты на твердость по Бринеллю биокomпозитов оказывает доля обоих компонентов наполнителя относительно полимерной фазы пластифицированного АЦ (рис. 6). При минимальном содержании в смеси наполнителей ДМ происходит уменьшение твердости по Бринеллю композитов с увеличением в них доли ОАП, а при максимальном – повышение показателей при росте доли ОАП. При минимальном содержании в смеси наполнителей ДМ

также наблюдается уменьшение прочности при изгибе композитов с ростом в них доли ОАП, а при максимальном – экстремальное изменение этих показателей и увеличение доли ОАП. Присутствие в смеси наполнителей ОАП до 10 мас. ч. относительно полимерной фазы пластифицированного триацетата целлюлозы с ростом содержания в композите ДМ приводит к снижению его прочности при изгибе, что не отмечено для биокомпозитов, наполненных только ДМ (рис. 3).

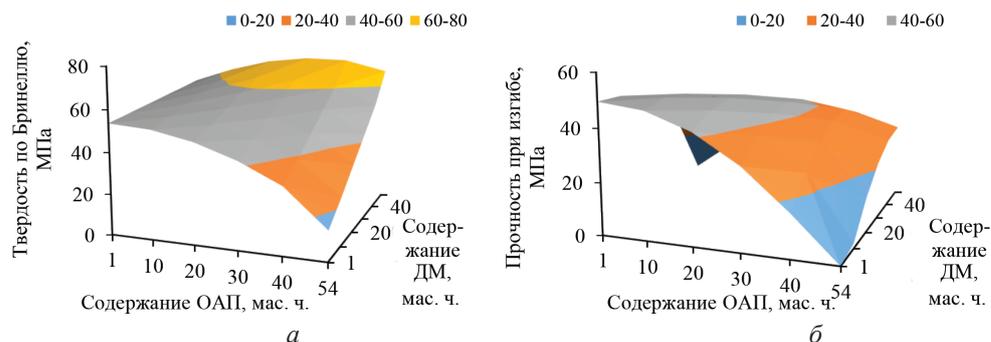


Рис. 6. Зависимости влияния содержания наполнителей в биокомпозитах с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы на их твердость по Бринеллю (а) и прочность при изгибе (б)

Fig. 6. Dependences of the influence of the content of fillers in biocomposites with a polymeric phase of plasticized cellulose triacetate on their Brinell hardness (a) and flexural rigidity (b)

Добавление к ДМ в качестве наполнителя измельченных ОАП приводит к снижению прочности при изгибе биокомпозитов с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы, но при содержании в них ОАП до 15 мас. ч. их преимущество перед эталонным древесно-полимерным композитом с фазой полиэтилена высокой плотности с содержанием древесной муки 50 % по ударной вязкости и прочности при изгибе сохраняется. По нашему мнению, это создает перспективы практического применения ОАП для производства биокомпозитов с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы.

Заключение

Результаты исследования показали возможность получения методом горячего прессования биокомпозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы со степенью ацетилирования 1,81–2,41 и наполнителем древесной мукой хвойных пород древесины марки 180. Выведены экспериментально-статистические зависимости влияния степени ацетилирования пластифицированного ацетата целлюлозы и содержания в композите древесной муки на степень его разложения при выдержке в активированном грунте, водопоглощение и ряд показателей физико-механических свойств. Установлено, что увеличение степени ацетилирования ацетата целлюлозы повышает стойкость композитов, полученных на его основе, при выдержке в активированном грунте и уменьшает их водопоглощение. При этом у биокомпозитов возрастают модуль упругости при сжатии и прочность при изгибе. По этим показателям полученные биокомпозиты во всем изученном диапазоне степени ацетилирования пластифицированного ацетата целлюлозы и содержания древесной муки

существенно превосходят эталонный древесно-полимерный композит с фазой полиэтилена высокой плотности с 50 % древесной муки в составе.

Полученные в ходе исследования данные также позволили выявить возможность использования отходов ацетатной фото пленки с древесной мукой в составе наполнителя для изготовления биокompозитов на основе пластифицированного триацетата целлюлозы. Добавление к древесной муке измельченных отходов ацетатной пленки приводит к снижению прочности при изгибе биокompозитов с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы, но при содержании в них отходов ацетатной пленки до 15 мас. ч. их преимущество перед эталонным древесно-полимерным композитом в показателях ударной вязкости и прочности при изгибе сохраняется, что создает перспективы практического применения отходов ацетатной фото пленки для производства биокompозитов с полимерной фазой пластифицированного триацетата целлюлозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников / под ред. Ю. Лонг. Пер. с англ. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 464 с.

Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Sources. Ed. by Yu. Long. Translated from English. Saint Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ., 2013. 464 p. (In Russ.).

2. Готлиб Е.М., Голованова К.В., Селехова А.А. Пути создания биоразлагаемых полимерных материалов и их получение на основе пластифицированных диацетатов целлюлозы. Казань: КНИТУ, 2011. 132 с.

Gotlib E.M., Golovanova K.V., Selekhnova A.A. *Ways of Creating Biodegradable Polymeric Materials and Their Production Based on Plasticised Cellulose Diacetates*. Kazan, KNRTU Publ., 2011. 132 p. (In Russ.).

3. Ольхов А.А., Хватов А.В., Попов А.А., Заиков Г.Е., Абзальдинов Х.С. Технологические свойства биодеструктурируемых материалов на основе диацетата целлюлозы и соевой муки // Вестн. технол. ун-та. 2016. Т. 19, № 1. С. 75–79.

Olkhov A.A., Khvatov A.V., Popov A.A., Zaikov G.E., Abzaldinov Kh.S. Technological Properties of Biodegradable Materials Based on Cellulose Diacetate and Soya Flour. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kazan Technological University, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 75–79. (In Russ.).

4. Casarano R., Fidale L.C., Lucheti C.M., Heinze T., Seoud O.A. Expedient, Accurate Methods for the Determination of the Degree of Substitution of Cellulose Carboxylic Esters: Application of UV–Vis Spectroscopy (Dye Solvatochromism) and FTIR. *Carbohydrate Polymers*, 2011, vol. 83, no. 3, pp. 1285–1292. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.09.035>

5. De Freitas R.R., Senna A.M., Botaro V.R. Influence of Degree of Substitution on Thermal Dynamic Mechanical and Physicochemical Properties of Cellulose Acetate. *Industrial Crops and Products*, 2017, vol. 109, pp. 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.062>

6. Del Gaudio I., Hunter-Sellars E., Parkin I.P. Williams D., Da Ros S., Curran K. Water Sorption and Diffusion in Cellulose Acetate: The Effect of Plasticisers. *Carbohydrate Polymers*, 2021, vol. 267, art. no. 118185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118185>

7. Feng J., Li S., Peng R., Sun T., Xie X., Shi Q. Effects of Fungal Decay on Properties of Mechanical, Chemical, and Water Absorption of Wood Plastic Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, vol. 138, no. 11, art. no. 50022. <https://doi.org/10.1002/app.50022>

8. Ghareeb H.O., Radke W. Characterization of Cellulose Acetates According to DS and Molar Mass Using Two-Dimensional Chromatography. *Carbohydrate Polymers*, 2013, vol. 98, no. 2, pp. 1430–1437. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.061>

9. Kono H., Hashimoto H., Shimizu Y. NMR Characterization of Cellulose Acetate: Chemical Shift Assignments, Substituent Effects, and Chemical Shift Additivity. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 118, pp. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.004>
10. Krishnamachari P., Hashaikh R., Tiner M. Modified Cellulose Morphologies and Its Composites; SEM and TEM Analysis. *Micron*, 2011, vol. 42, no. 8, pp. 751–761. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2011.05.001>
11. Polman E.M.N., Gruter G.M., Parsons J.R., Tietema A. Comparison of the Aerobic Biodegradation of Biopolymers and the Corresponding Bioplastics: A Review. *The Science of the Total Environment*, 2021, vol. 753, art. no. 141953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141953>
12. Rodriguez L.J., Peças P., Carvalho H., Orrego C.E. A Literature Review on Life Cycle Tools Fostering Holistic Sustainability Assessment: An Application in Biocomposite Materials. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 262, art. no. 110308. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110308>
13. Samios E., Dart R.K., Dawkins J.V. Preparation, Characterization and Biodegradation Studies on Cellulose Acetates with Varying Degrees of Substitution. *Polymer*, 1997, vol. 38, no. 12, pp. 3045–3054. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(96\)00868-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(96)00868-3)
14. Senna A.M., Botaro V.R. Biodegradable Hydrogel Derived from Cellulose Acetate and EDTA as a Reduction Substrate of Leaching NPK Compound Fertilizer and Water Retention in Soil. *Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society*, 2017, vol. 260, pp. 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.06.009>
15. Senna A.M., Menezes A.J., Botaro V.R. Estudo Da Densidade de Ligações Cruzadas Em Géis Superabsorventes Obtidos Do Acetato de Celulose. *Polímeros*, 2012, vol. 23, no. 1, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000078>
16. Suvorova A.I., Demchik L.Y., Peshekhonova A.L., Sdobnikova O.A. Chemical Structure of Plasticizers, Compatibility of Components and Phase Equilibrium in Plasticized Cellulose Diacetate. *Die Makromolekulare Chemie*, 1993, vol. 194, no. 5, pp. 1315–1321. <https://doi.org/10.1002/macp.1993.021940506>
17. Takatani M., Ikeda K., Sakamoto K., Okamoto T. Cellulose Esters as Compatibilizers in Wood / Poly (Lactic Acid) Composite. *Journal of Wood Science*, 2008, vol. 54, no. 1, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1007/s10086-007-0911-y>
18. Vandermeulen G.W., Boarino A., Klok H.A. Biodegradation of Water-Soluble and Water-Dispersible Polymers for Agricultural, Consumer, and Industrial Applications—Challenges and Opportunities for Sustainable Materials Solutions. *Journal of Polymer Science*, 2022, vol. 60, no. 12, pp. 1797–1813. <https://doi.org/10.1002/pol.20210922>
19. Watanabe S., Takai M., Hayashi J. An X-Ray Study of Cellulose Triacetate. *Journal of Polymer Science Part C Polymer Symposia*, 2007, vol. 23, no. 2, pp. 825–835. <https://doi.org/10.1002/polc.5070230238>
20. Vinod A., Sanjay M.R., Suchart S., Jyotishkumar P. Renewable and Sustainable Biobased Materials: An Assessment on Biofibers, Biofilms, Biopolymers and Biocomposites. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 258, art. no. 120978. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120978>
21. Yadav N., Hakkarainen M. Degradable or Not? Cellulose Acetate as a Model for Complicated Interplay Between Structure, Environment and Degradation. *Chemosphere*, 2021, vol. 265, art. no. 128731. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128731>

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 676.038:676.017.44

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-169-179

Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи

А.А. Пенкин¹✉, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [GUS-7006-2022](https://orcid.org/0000-0001-5773-6797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5773-6797>

Я.В. Казаков², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

¹Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13 а, Минск, Республика Беларусь, 220006; penkin@belstu.by✉

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; j.kazakov@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.07.22 / Одобрена после рецензирования 23.10.22 / Принята к печати 30.10.22

Аннотация. Процесс размола волокнистой массы из вторичного волокнистого сырья в зависимости от режима связан со значительным изменением структурно-морфологических характеристик вторичного волокна и возникновением дополнительных количеств волокнистой мелочи. Последняя оказывает существенное влияние на свойства волокнистой массы, технологический процесс изготовления бумаги и показатели качества получаемой продукции. Степень влияния волокнистой мелочи на качество продукции и процесс ее изготовления, в свою очередь, зависит от структурно-морфологических свойств частиц мелочи. Цель работы – исследование структурно-морфологических свойств волокнистой мелочи, содержащейся во вторичном волокне из влагопрочного сырья, образующейся в процессе мягкого размола волокнистой массы. Вторичное волокно получено в результате роспуска влагопрочной тисью на основе беленой сульфатной целлюлозы по нескольким вариантам: в условиях тепловой обработки массы в присутствии едкого натра (NaOH), в условиях реагентно-щелочной обработки с применением в качестве активаторов роспуска персульфата натрия (NaOH + Na₂S₂O₈) и моноперсульфата калия (NaOH + KHSO₅). С использованием оптического анализатора L&W Fiber Tester установлено, что при мягком размоле волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением персульфата натрия и моноперсульфата калия, происходит незначительное увеличение доли мелочи – в среднем на 0,20...0,28 % по длине и на 0,9...1,5 % по количеству частиц мелочи. Волокнистая мелочь представляет собой относительно прямые частицы (средневзвешенный по длине фактор формы – 93,5...94,0 %), обладающие малой полидисперсностью (отношение средневзвешенного по длине и среднеарифметического значения длины – 1,08...1,09). Средний коэффициент вытянутости частиц мелочи составляет около 7, в отдельных классах длины – до 8...9. Микрофотографии поверхности бумаги – результаты работы сканирующего электронного микроскопа, – а также значения средних длины частиц волокнистой мелочи (132...134 мкм) и ширины вторичных волокон (29,7...30,0 мкм) показывают, что мелочь способна участвовать в дополнительном межволоконном связеобразовании посредством формирования мостиков между волокнами в зоне их потенциального контакта.

Ключевые слова: влагопрочная макулатура, роспуск, вторичное волокно, мягкий размол, мелочь, структурно-морфологические свойства

Для цитирования: Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 169–179. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-169-179>

Original article

Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of the Recycled Pulp. Part 2. Fines Characteristics

Anton A. Penkin[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [GUS-7006-2022](https://orcid.org/0000-0001-5773-6797), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5773-6797>

Yakov V. Kazakov², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

¹Belarusian State Technological University, ul. Sverdlova, 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; penkin@belstu.by[✉]

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; j.kazakov@narfu.ru

Received on July 10, 2022 / Approved after reviewing on October 23, 2022 / Accepted on October 30, 2022

Abstract. The process of recycled pulp refining is usually associated with a significant change in the morphological characteristics of the secondary fiber and the formation of additional amounts of fines. It is well known that fines have a great impact on the pulp properties, the papermaking process and the quality of the resulting paper. At the same time, the effect of fines both on the paper properties and on the papermaking process depends on the morphological characteristics of the fines. The aim of the study was to evaluate the changes in the morphological characteristics of the fines during gentle low-consistency refining of the recycled pulp. The recycled pulp was obtained from commercial wet-strength tissue paper, consisting of 100 % bleached softwood kraft pulp (BSKP) made from pine (*Pinus sylvestris* L.). The repulping of wet-strength paper was performed at 60 °C in three ways, namely, repulping with sodium hydroxide (indicated as RP (NaOH)), repulping with sodium hydroxide and sodium persulfate (RP (NaOH + Na₂S₂O₈)), and finally repulping with sodium hydroxide and potassium monopersulfate (RP (NaOH + KHSO₅)). Using an optical fiber analyzer, L&W Fiber Tester, it was found that accelerated persulfate and monopersulfate repulping of the wet-strength paper led to an increase in fines content after pulp refining by 0.20...0.28 % on length and by 0.9...1.5 % on number of particles. In addition, some fines were not detected due to the limited resolution of the measuring device. The morphological characteristics of the recycled pulps showed that the studied fines were relatively straight particles ($S_l = 93.5...94.0$ %) with low length polydispersity ($(L_l/L_n) = 1.08...1.09$). Fines had a mean slenderness ratio $(L/W)_l$ and $(L/W)_w$ of about 7, which in some length classes reached 8...9. Taking into account the experimental data on fines length ($L_l = 132...134$ μm) and fiber width ($W_l = 29.7...30.0$ μm), as well as SEM images of recycled paper, we can conclude that



these particles can form fines-assisted bridges between several close deposited fibers in the fiber network, thus strengthening the paper web.

Keywords: wet-strength paper, repulping, recycled pulp, gentle refining, fines, morphological characteristics

For citation: Penkin A.A., Kazakov Y.V. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of the Recycled Pulp. Part 2. Fines Characteristics. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 169–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-169-179>

Введение

Использование мягких режимов размола с целью максимального сохранения исходной длины и других структурно-морфологических характеристик вторичного волокна (ВВ) является одним из основных принципов подготовки макулатурной массы [3, 5, 10]. В ходе 1-й части работы [2] установлено, что на изменение структурно-морфологических свойств ВВ при мягком размол волокнистой массы из влагопрочной макулатуры оказывают влияние специфические условия процесса ее роспуска, такие как тепловая и реагентно-щелочная обработка. Мягкий размол волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ и KHSO_5 , приводит к определенному выпрямлению волокон и соответствующему увеличению их фактора формы. При этом ускоренный роспуск обеспечивает около 60 %, а мягкий размол – около 40 % от общего роста фактора формы ВВ, достигаемого в результате комбинирования условий массоподготовки [2].

Учитывая, что процесс размола вторичных волокнистых полуфабрикатов в той или иной степени приводит к появлению дополнительных количеств мелочи [7, 14, 19], а также принимая во внимание существенное влияние мелочи на свойства волокнистой массы, технологический процесс изготовления и показатели качества получаемой бумаги [7, 14, 15, 18, 19], в настоящей работе изучены структурно-морфологические свойства волокнистой мелочи. Использован автоматический анализатор, реализующий оптический метод оценки структурно-морфологических характеристик волокнистых полуфабрикатов. Несмотря на то, что некоторое количество частиц мелочи лежит за пределами уровня детекции, свойственного для оптических анализаторов, данному методу оценки мелочи уделяется значительное внимание [13, 15, 16]. Применительно к влагопрочной макулатуре исследования подобного типа выполнены впервые.

Цель работы – изучение структурно-морфологических свойств волокнистой мелочи, содержащейся во ВВ из влагопрочного сырья, образующейся в процессе мягкого размола волокнистой массы.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования, как и в 1-й части работы, стало ВВ, полученное из макулатуры в виде влагопрочной тисью на основе беленой сульфатной целлюлозы из древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – СФАХБЦ. Предметом – структурно-морфологические свойства волокнистой мелочи.

Свойства использованной влагопрочной макулатуры, лабораторные условия процессов ее роспуска, размола волокнистой массы, особенности применяемого для размола лабораторного оборудования были подробно описаны в 1-й части работы. При этом ВВ было получено в процессе роспуска влагопрочной макулатуры по нескольким вариантам: в условиях тепловой обработки массы в присутствии едкого натра – ВВ (NaOH), в условиях реагентно-щелочной обработки с применением в качестве активаторов роспуска персульфата натрия – ВВ (NaOH + Na₂S₂O₈) – и моноперсульфата калия – ВВ (NaOH + KHSO₅) [2].

Структурно-морфологические свойства ВВ исследованы с помощью оптического анализатора L&W Fiber Tester [1]. В соответствии с международным стандартом ISO 16065-1:2014 [11], регламентирующим условия определения длины волокнистых полуфабрикатов оптическим методом, мелочью являются объекты волокнистой массы длиной менее 200 мкм. Разбиение исходных данных (Raw Data) на 2 группы: данные для волокон и данные для мелочи – и выполнение соответствующих расчетов дают возможность детальной характеристики не только волокон (как это происходит при автоматических расчетах на оптическом анализаторе), но и частиц мелочи.

На основании первичных данных для частиц мелочи был определен еще один структурно-геометрический параметр – коэффициент формы, или коэффициент вытянутости, представляющий собой отношение длины частиц мелочи к их ширине [4, 6, 16]. Коэффициент вытянутости применительно к частицам мелочи имеет важное значение, поскольку определяет ее тип и свойства [16].

Исходные данные разбивали на 10 классов по длине: |50...65|, |65...80|, |80...95|, |95...110|, |110...125|, |125...140|, |140...155|, |155...170|, |170...185| и |185...200| мкм.

В каждом классе для частиц мелочи находили средние длину l_i , ширину w_i , фактор формы (прямызны) s_i и коэффициент вытянутости l_i/w_i .

С учетом количества частиц мелочи в каждом классе по формулам [9, 11, 16] рассчитывали средние арифметические и средневзвешенные по длине и массе значения длины L_n, L_l, L_w , ширины W_n, W_l, W_w , фактора формы S_n, S_l, S_w и коэффициента формы $(L/W)_n, (L/W)_l, (L/W)_w$.

Полидисперсность частиц мелочи по длине и по массе вычисляли соответственно как отношение L_l/L_n и L_w/L_n [20].

Для построения диаграмм распределения мелочи по длине долю по длине мелочи определяли как процентное отношение суммарной длины частиц мелочи в i -м классе к общей длине мелочи во всех классах ($i = 1...10$), долю по числу частиц мелочи – как процентное отношение суммарного количества частиц мелочи в i -м классе к общему количеству мелочи во всех классах. Содержание мелочи по длине находили как процентное отношение суммарной длины мелочи к общей длине волокон и длине мелочи в анализируемой пробе, содержание мелочи по числу частиц – как процентное отношение количества частиц мелочи к общему количеству волокон и количеству частиц мелочи в анализируемой пробе.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показано влияние мягкого размола волокнистой массы на содержание мелочи.

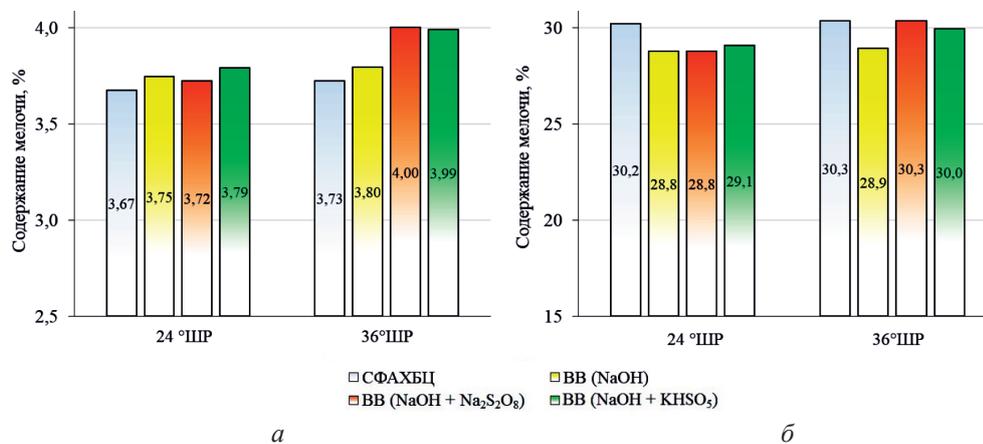


Рис. 1. Влияние мягкого размола на содержание мелочи: *a* – по длине; *б* – по числу частиц
Fig. 1. Effect of gentle refining of the pulps on length weighted (*a*) and arithmetic (*б*) fines content (L&W Fiber Tester)

Из представленных на рис. 1 данных видно, что наименьшее содержание мелочи по длине, как до, так и после мягкого размола, характерно для первичного волокна – сульфатной хвойной целлюлозы. Более низкое содержание мелочи по количеству частиц отмечено для ВВ. Первое можно объяснить большей средней длиной волокон целлюлозы. Так, средневзвешенные значения длины L_l и L_w для целлюлозы до размола составляют соответственно 2,15 и 2,72 мм, для ВВ из влагопрочной макулатуры – соответственно 2,01...2,02 и 2,58 мм [2]. Значения L_l и L_w для целлюлозы после размола – 2,14 и 2,70 мм соответственно, для ВВ из влагопрочной макулатуры – 1,99...2,00 и 2,57...2,58 мм [2] соответственно. Второе обстоятельство, на наш взгляд, связано с частичным вымыванием мелочи при формовании бумаги в сеточной части бумагоделательной машины.

В процессе мягкого размола волокнистой массы, полученной с применением ускоренного роспуска, доля мелочи увеличивается в среднем на 0,20...0,28 % по длине и на 0,9...1,5 % по количеству частиц. Как отмечалось ранее [2], средняя длина волокон в процессе мягкого размола практически не изменяется. Поэтому можно полагать, что образование дополнительного количества мелочи происходит в основном не за счет поперечного измельчения (рубки) волокон, а в результате продольного деламинирования фрагментов клеточной стенки и внешнего фибриллирования волокон. Образование мелочи при мягком размоле ВВ, полученного в результате ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры, выражено в большей степени, чем при продолжительной щелочной обработке макулатуры.

На рис. 2 представлены диаграммы распределения по длине частиц мелочи.

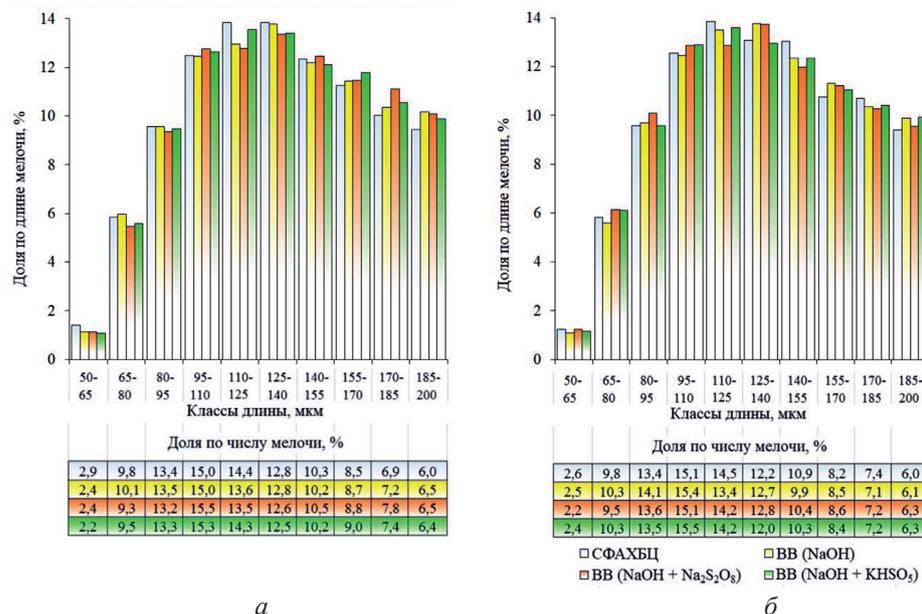


Рис. 2. Распределение частиц мелочи по длине в процессе мягкого размола волокнистой массы: *а* – до размола (24 °ШР); *б* – после размола (36 °ШР)

Fig. 2. Fines length distributions (L&W Fiber Tester): *a* – before gentle refining of the pulps (24 °SR); *б* – after gentle refining of the pulps (36 °SR)

Как видно из рис. 2, мягкий размол волокнистой массы практически не изменяет распределение по длине частиц мелочи. Это справедливо как для первичного полуфабриката в виде сульфатной хвойной целлюлозы, так и для вторичного влагопрочного сырья, изготовленного на ее основе.

На рис. 3–5 показаны зависимости ширины, коэффициента вытянутости и фактора формы от средней длины частиц мелочи в классах до и после мягкого размола волокнистой массы.

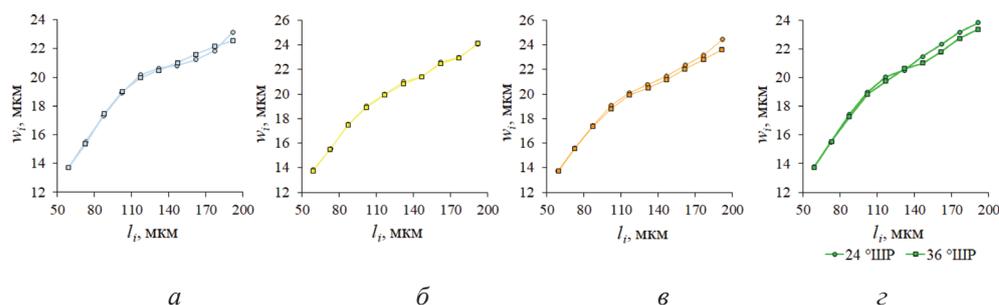


Рис. 3. Зависимость ширины от длины частиц мелочи до и после мягкого размола волокнистой массы: *а* – СФАХБЦ; *б* – ВВ (NaOH); *в* – ВВ (NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – ВВ (NaOH + KHSO₅)

Fig. 3. Fines length vs fines width before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – RP(NaOH + KHSO₅)

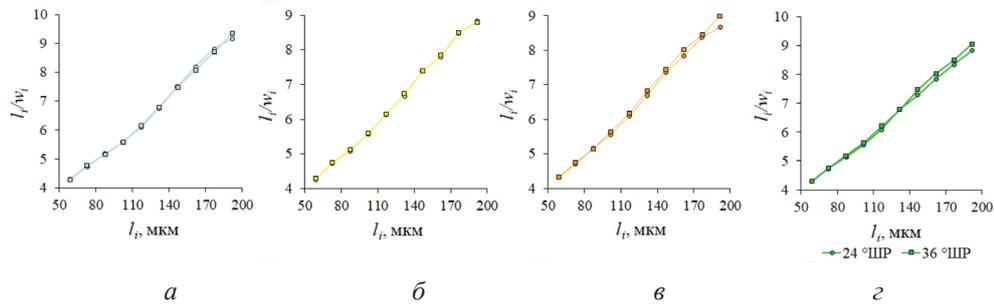


Рис. 4. Зависимость коэффициента вытянутости от длины частиц мелочи до и после мягкого размола волокнистой массы: *a* – СФАХБЦ; *б* – ВВ (NaOH); *в* – ВВ (NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – ВВ (NaOH + KHSO₅)

Fig. 4. Fines length vs fines slenderness ratio before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – RP(NaOH + KHSO₅)

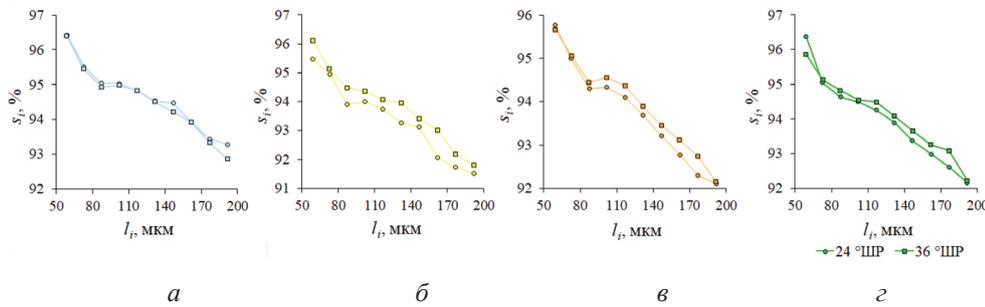


Рис. 5. Зависимость фактора формы от длины частиц мелочи до и после мягкого размола волокнистой массы: *a* – СФАХБЦ; *б* – ВВ (NaOH); *в* – ВВ (NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – ВВ (NaOH + KHSO₅)

Fig. 5. Fines length vs fines shape factor before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – RP(NaOH + KHSO₅)

Из представленных графических зависимостей видно, что характеристики мелочи при мягком размоле волокнистой массы практически не изменяются, исключение составляет фактор формы, который демонстрирует незначительное увеличение в случае использования вторичного влагопрочного сырья. Также стоит иметь ввиду, что некоторое количество частиц мелочи может находится за пределами уровня детекции оптического анализатора.

Средние значения структурно-морфологических параметров мелочи до и после размола волокнистой массы также остаются приблизительно на одном уровне (см. таблицу).

Данные таблицы в целом характеризуют мелочь, находящуюся в волокнистой массе из вторичного влагопрочного сырья, как относительно прямые частицы – $S_l = 93,5...94,0$ %, – обладающие малой полидисперсностью – $(L_l/L_n) = 1,08...1,09$. Средний коэффициент вытянутости частиц мелочи составляет около 7, достигая в классах длины |155...170|, |170...185|, |185...200| мкм до 8...9 (рис. 4, б–г). На основании данных значений коэф-

фициента вытянутости частиц мелочи можно полагать, что они способны к образованию мостичных структур, или мостиков [16], между близлежащими волокнами в структуре бумажного листа (рис. 6).

Структурно-морфологических параметры частиц мелочи
Morphological characteristics of pulp fines

Структурно-морфологический параметр мелочи	Значение параметра							
	СФАХБЦ		NaOH		NaOH + Na ₂ S ₂ O ₈		NaOH + KHSO ₅	
	Степень помола, °ШР							
	24	36	24	36	24	36	24	36
Средняя длина, мкм: L_n	122	123	123	123	124	122	123	122
L_l	133	133	134	133	134	132	134	133
L_w	142	143	143	143	144	142	143	143
Полидисперсность: по длине (L_l/L_n)	1,09	1,08	1,09	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09
по массе (L_w/L_n)	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,17
Средняя ширина, мкм: W_n	19,6	19,6	20,0	20,0	20,1	19,7	20,0	19,7
W_l	20,1	20,1	20,6	20,6	20,7	20,3	20,6	20,2
W_w	20,6	20,6	21,3	21,2	21,3	20,9	21,2	20,8
Средний коэффициент вытянутости: $(L/W)_n$	6,6	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
$(L/W)_l$	6,9	6,9	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,9
$(L/W)_w$	7,3	7,3	7,1	7,2	7,1	7,2	7,1	7,2
Средний фактор формы, %: S_n	94,6	94,5	93,4	93,8	93,7	94,0	93,9	94,1
S_l	94,5	94,4	93,1	93,6	93,5	93,8	93,7	93,9
S_w	94,3	94,2	92,8	93,3	93,3	93,5	93,5	93,7

Средняя длина частиц мелочи ($L_l = 132...134$ мкм) больше средней ширины волокон ($W_l = 29,7...30,0$ мкм [2]), поэтому в зону потенциального контакта могут одновременно попадать более двух близлежащих волокон. Образование мостиков с участием частиц мелочи позволяет более равномерно распределять нагрузку в зоне контакта волокон [16] и, как следствие, способно оказывать дополнительное к внешнему и внутреннему фибриллированию волокон при размоле [8, 12, 17] положительное влияние на механические свойства бумаги.

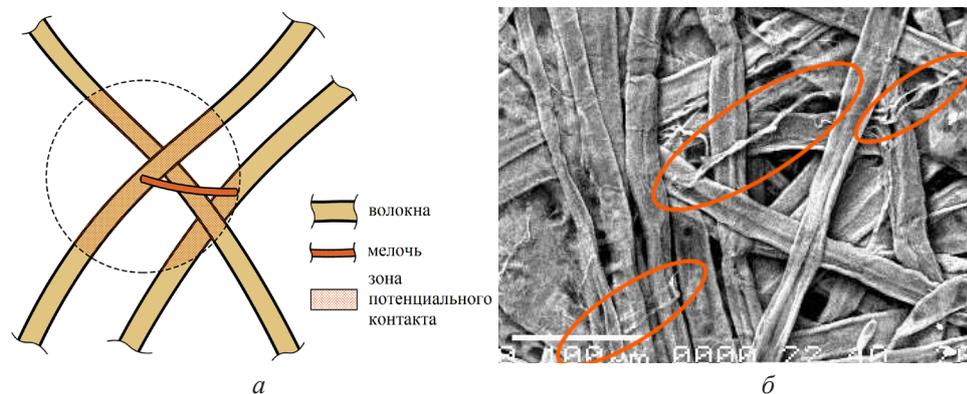


Рис. 6. Мостики между близлежащими волокнами, образованные с участием частиц мелочи: *a* – принцип образования; *б* – присутствие в структуре бумаги

Fig. 6. Load-carrying bridges composed of fines material in fiber network: *a* – mechanism of bridges formation; *б* – presence of bridges in the paper web (SEM)

Заключение

Исследованы структурно-морфологические свойства волокнистой мелочи, содержащейся во вторичном волокне из влагопрочного сырья, образующейся в процессе мягкого размола волокнистой массы.

Установлено, что при мягком размоле волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением персульфата натрия и монопсульфата калия, происходит незначительное увеличение доли мелочи – в среднем на 0,20...0,28 % по длине и на 0,9...1,5 % по количеству частиц.

Волокнистая мелочь представляет собой относительно прямые частицы (средневзвешенный по длине фактор формы – 93,5...94,0 %), обладающие малой полидисперсностью (отношение средневзвешенного по длине и среднеарифметического значения длины – 1,08...1,09). Средний коэффициент вытянутости частиц мелочи составляет около 7, в классах длины |155...170|, |170...185|, |185...200| мкм достигает до 8...9.

С учетом найденных средних длины частиц мелочи (132...134 мкм) и ширины волокон (29,7...30,0 мкм) показано, что частицы волокнистой мелочи способны участвовать в дополнительном межволоконном связеобразовании посредством формирования мостиков между волокнами в зоне их потенциального контакта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 269–275.

Kazakov Y.V. The Characteristic of Geometrical Parameters of Cellulose Fibers in Pulp Using Probabilistic Approach. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Material, 2014, no. 1, pp. 269–275. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401269>

2. Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагонепроницаемого сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 157–172.

Penkin A.A., Kazakov Y.V. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of the Recycled Pulp. Part 1: Fiber Characteristics. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 157–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-157-172>

3. Смолин А. Вторичные волокна в современной технологии ЦБП // ЛесПромИнформ. 2015. № 4(110). С. 146–148.

Smolin A.S. Secondary Fibres in Modern Pulp and Paper Technology. *LesPromInform*, 2015, no. 4(110), pp. 146–148. (In Russ.).

4. Area M.C., Popa V.I. *Wood Fibres for Papermaking*. Shawbury, Smithers Rapra Technology Ltd. Publ., 2014. 106 p.

5. Debnath M., Salem K.S., Naithani V., Musten E., Hubbe M.A., Pal L. Soft Mechanical Treatments of Recycled Fibers Using a High Shear Homogenizer for Tissue and Hygiene Product. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 7981–7994. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04024-0>

6. Ferdous T., Quaiyyum M.A., Bashar S., Jahan M.S. Anatomical, Morphological and Chemical Characteristics of Kaun Straw (*Seetaria-Italika*). *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 288–298. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0057>

7. Fischer W.J., Mayr M., Spirk S., Reishofer D., Jagiello L.A., Schmiedt R., Colson J., Zankel A., Bauer W. Pulp Fines – Characterization, Sheet Formation, and Comparison to Microfibrillated Cellulose. *Polymers*, 2017, vol. 9, iss. 8, art. no. 366. <https://doi.org/10.3390/polym9080366>

8. Gharekhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N. Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties – A Review. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 115, pp. 785–803. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>

9. Karlsson H., Rinnevuoto T. *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry: A Handbook*. Kista, AB Lorentzen & Wettre Publ., 2006. 120 p.

10. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What Happens to Cellulosic Fibers During Papermaking and Recycling? A Review. *BioResources*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 739–788. <https://doi.org/10.15376/BIORES.2.4.739-788>

11. ISO 16065-1:2014 *Pulps – Determination of Fibre Length by Automated Optical Analysis. Part 1: Polarized Light Method*. 2014. 10 p.

12. Johnsen I.A., Stenius P.I., Tammelin T., Österberg M., Johansson L., Laine J. The Influence of Dissolved Substances on Resin Adsorption to TMP Fine Material. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2006, vol. 21, no. 5, pp. 629–637. <https://doi.org/10.3183/npprj-2006-21-05-p629-637>

13. Luukko K., Kemppainen-Kajola P., Paulapuro H. Characterization of Mechanical Pulp Fines by Image Analysis. *Appita Journal*, 1997, vol. 50, pp. 387–392.

14. Mandlez D., Zangl-Jagiello L., Eckhart R., Bauer W. Softwood Kraft Pulp Fines: Application and Impact on Specific Refining Energy and Strength Properties. *Cellulose*, 2020, vol. 27, pp. 10359–10367. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03467-1>

15. Mayr M., Eckhart R., Thaller A., Bauer W. Characterization of Fines Quality and Their Independent Effect on Sheet Properties. In *Advances in Pulp and Paper Research. Proceedings of the 16th Fund. Res. Symp. Oxford, 2017*. Ed. by W. Batchelor, D. Söderberg. Manchester, FRC Publ., 2018, pp. 299–322. <https://doi.org/10.15376/frc.2017.1.299>

16. Motamedian H.R., Halilović A.E., Kulachenko A. Mechanisms of Strength and Stiffness Improvement of Paper After PFI Refining with a Focus on the Effect of Fines. *Cellulose*, 2019, vol. 26, pp. 4099–4124. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02349-5>

17. Popa V.I. *Pulp Production and Processing: From Papermaking to High-Tech Products*. Shawbury, Smithers Rapra Technology Ltd. Publ., 2013. 520 p.

18. Pöhler T., Ketoja J.A., Lappalainen T., Luukkainen V., Nurminen I., Lahtinen P., Torvinen K. On the Strength Improvement of Lightweight Fibre Networks by Polymers, Fibrils and Fines. *Cellulose*, 2020, vol. 27, pp. 6961–6976. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03263-x>

19. Winter A., Gindl-Altmutter W., Mandlez D., Bauer W., Eckhart R., Leitner J., Veigel S. Reinforcement Effect of Pulp Fines and Microfibrillated Cellulose in Highly Densified Binderless Paperboards. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 115, art. no. 125258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125258>

20. Wistara N.J., Young R.A. Properties and Treatments of Pulps from Recycled Paper. Part I. Physical and Chemical Properties of Pulps. *Cellulose*, 1999, vol. 6, pp. 291–324. <https://doi.org/10.1023/A:1009221125962>

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



Научная статья

УДК 630*2

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-180-189

Регуляция соковыделения при подсочке березы *Betula pendula* Roth

А.В. Грязькин¹✉, *д-р биол. наук, проф.*; *ResearcherID*: [C-6699-2018](https://orcid.org/0000-0002-7901-2180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

Д.А. Данилов^{1,2}, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [S-7007-2019](https://orcid.org/0000-0002-7504-5743),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>

Д.А. Зайцев², *канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.*; *ResearcherID*: [AAG-8964-2021](https://orcid.org/0000-0002-8704-6516)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8704-6516>

Минь Ань Хоанг¹, *аспирант*; *ResearcherID*: [ABB-5138-2021](https://orcid.org/0000-0003-3025-803X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-803X>

Чан Чунг Тхань¹, *аспирант*; *ResearcherID*: [ABB-4415-2021](https://orcid.org/0000-0002-0728-3547),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0728-3547>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; lesovod@bk.ru✉, stovn200@mail.ru, minhanh_hoang@outlook.com, thanh.tt@rcfee.org.vn

²Ленинградский НИИСХ «Белогорка» – филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха, ул. Институтская, д. 1, д. Белогорка, Гатчинский р-н, Ленинградская обл., Россия, 188338; disoks@gmail.com

Поступила в редакцию 27.04.21 / Одобрена после рецензирования 07.08.21 / Принята к печати 14.08.21

Аннотация. В ходе исследования была выявлена корреляция между интенсивностью выделения сока березой и диаметром ствола, степенью развития кроны и возрастом дерева. Интенсивность выделения сока также зависела от погодных условий и способа подсочки. Объектом исследования стал спелый березовый древостой с черничным напочвенным покровом (Киришское лесничество Ленинградской области, Россия). Состав древостоя (%): 65 – березы, 21 – ели, 8 – осины, 3 – ольхи, 2 – вяза, 1 – клена. Полнота – 0,6. Проективное покрытие полога – 0,73. Средние возраст, диаметр и высота – 76 лет, 25 см и 24,3 м соответственно. Подсочка проводилась закрытым способом. Каналы находились на 30–40 см выше корневой шейки. Установлено, что интенсивность выделения сока зависит от количества каналов и их расположения. Максимальная интенсивность выделения сока из одного канала составляла 285 мл/ч, в зависимости от диаметра ствола и возраста дерева. Интенсивность выделения сока менялась в течение дня: увеличивалась с утра и до 13–14 ч дня и затем уменьшалась до позднего вечера. Ночью она была наименьшей, либо сок не выделялся, независимо от возраста дерева, степени развития кроны и диаметра ствола. При среднесуточной температуре от +3 до +6 °С в пасмурную погоду каждое дерево давало сока 0,54–1,37 л/сут., а при более высокой температуре в солнечную погоду – 2,50–6,22 л/сут. Чем выше температура воздуха и почвы, тем интенсивнее соковыделе-

ние. При температуре воздуха -3°C сок замерзает. Если среднесуточная температура воздуха в течение нескольких дней держится выше $+10^{\circ}\text{C}$, сок начинает сбраживаться.

Ключевые слова: лесной фитоценоз, древостой, березовый древостой, выделение сока, интенсивность выделения сока, *Betula pendula* Roth

Для цитирования: Грязькин А.В., Данилов Д.А., Зайцев Д.А., Хоанг Минь Ань, Тхань Чан Чунг. Регуляция соковыделения при подсочке березы *Betula pendula* Roth // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 180–189. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-180-189>

Original article

Regulation of Sap Release when Tapping *Betula pendula* Roth

Anatoly V. Gryazkin¹✉, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [C-6699-2018](https://orcid.org/0000-0002-7901-2180).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

Dmitriy A. Danilov^{1,2}, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [S-7007-2019](https://orcid.org/0000-0002-7504-5743).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>

Dmitriy A. Zaytsev², Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAG-8964-2021](https://orcid.org/0000-0002-8704-6516), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8704-6516>

Minh Anh Hoang¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABB-5138-2021](https://orcid.org/0000-0003-3025-803X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-803X>

Tran Trung Thanh¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABB-4415-2021](https://orcid.org/0000-0002-0728-3547).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0728-3547>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; lesovod@bk.ru✉, stowm200@mail.ru, minhanh_hoang@outlook.com, thanhtt@rcfee.org.vn

²Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre, ul. Institutskaya, 1, d. Belogorka, Gatchinskiy District, Leningrad Region, 188338, Russian Federation; disoks@gmail.com

Received on April 27, 2021 / Approved after reviewing on August 7, 2021 / Accepted on August 14, 2021

Abstract. The study showed a correlation between the intensity of sap release by birch trees and the trunk diameter, degree of crown development, and tree age. In addition to the characteristics of trees, sap release intensity also depended on weather conditions and tapping methods. The study object was a mature birch stand with blueberry ground cover (Kirishi forestry unit of the Leningrad region, Russia). The composition of the stand consisted of birch (65 %), spruce (21 %), aspen (8 %), alder (3 %), elm (2 %), and maple (1 %); the basal area was 0.6. The projective cover was 0.73. The average age, diameter and height were 76 yrs, 25.0 cm and 24.3 m, respectively. Tapping was carried out by the closed method. The tapping channels were 30–40 cm above the root neck. The intensity of sap release was found to depend on the number of channels and their location. The maximum intensity of sap release from one tapping channel was 285 mL/h, depending on the trunk diameter and tree age. The intensity of sap release varied throughout the day: it increased in the morning and early afternoon (until 1–2 pm), and decreased in the late afternoon. At night, sap release intensity was the lowest, or it stopped completely regardless of the tree's age, degree of crown development, and trunk diameter. At the average daily temperature between $+3$ and $+6^{\circ}\text{C}$ in moky weather, each tree produced 0.54–1.37 L of sap per day, and at a higher temperature in

sunny weather, 2.50–6.22 L per day. The higher the air and soil temperatures, the more intense the sap release. At the air temperature of $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, the sap freezes. When the average daily air temperature stays above $+10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ for several days, the sap begins to ferment.

Keywords: forest phytocenosis, forest stand, birch stand, sap release, sap release intensity, *Betula pendula* Roth

For citation: Gryazkin A.V., Danilov D.A., Zaytsev D.A., Hoang Minh Anh, Thanh Tran Trung. Regulation of Sap Release when Tapping *Betula pendula* Roth. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 180–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-180-189>

Введение

Ресурсы лесного фонда – экологически чистое сырье. С каждым годом линейка продукции, получаемой в лесных экосистемах, расширяется, наметилась тенденция комплексного использования лесных ресурсов [1, 6–8, 10, 15, 18–20]. Сформировалось особое направление природопользования – агролесные фирмы и комплексы [18, 19]. Многочисленные публикации свидетельствуют о росте интереса исследователей многих стран мира к разнообразным ресурсам леса [1–8, 10–13, 15–17, 19–22].

По сравнению с другими государствами, имеющими на своей территории леса, Россия особенно богата дарами леса. Этими дарами, в первую очередь лекарственными, пищевыми и медоносными ресурсами, техническим сырьем, население пользуется в течение многих веков [1–4, 11–13, 21].

Березовый сок относится к пищевым ресурсам. Заготовка и использование березового сока на территории России ведутся с давних времен и до настоящего момента. В Беларуси, на Украине, в Эстонии, Латвии и Литве также и сегодня заготавливается березовый сок, что объясняется наличием в этих странах больших площадей березовых лесов. Березовый и кленовый сок широко используются во многих странах мира [1–4, 7–13, 15–17, 19–22].

Опубликован ряд исследований, посвященных заготовке березового сока и влиянию внешних условий на сокопродуктивность [3, 4, 7, 9, 10, 15, 17, 22]. Есть публикации о воздействии температуры и других факторов внешней среды на интенсивность соковыделения в условиях лесостепи [3, 4, 7, 10, 15]. В [4, 12, 16, 17, 19, 22] рассмотрены свойства березового сока и его использование не только в качестве пищевого продукта, но и в медицинских целях и в косметических продуктах.

Цель исследования – установить основные факторы, воздействующие на соковыделение при подсочке *Betula pendula* Roth, а также степень влияния каждого из них.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – березняк смешанного состава в 28-м выделе 82-го квартала Киришского лесничества Ленинградской области. Состав древостоя – 65Б21Е8Ос3Ол,2Вяз1Кл, средний возраст – 76 лет, относительная полнота – 0,6, сомкнутость крон – 73 %, запас – 344 м³/га. Средний диаметр стволов – 25 см, средняя высота – 24,3 м. Класс бонитета – II. Тип леса

(по В.Н. Сукачеву) – березняк черничный, тип условий местопроизрастания (по П.С. Погребняку) – В₂. Координаты лесного участка – 59°22'328" с. ш. и 32°15'423" в. д.

При сплошном перече́те деревьев фиксировали диаметр ствола и степень развития кроны. Из общего количества деревьев из опыта были исключены поврежденные, больные, наклонившиеся деревья и деревья с диаметром ствола менее 18 см, так как по действующим правилам подсочка таких деревьев запрещена [9].

В ходе геоботанического описания лесного участка отмечали элементы микрорельефа, измеряли освещенность, температуру воздуха и почвы, динамику и продолжительность соковыделения. Учет нижних ярусов растительности (подроста, подлеска, травяно-кустарничкового и мохово-лишайниковых ярусов) проводили на круговых учетных площадках радиусом 1,785 м (10 м²) в соответствии с патентом РФ № 2084129 [6].

Подсочку осуществляли закрытым способом. На одном стволе закладывали от 1 до 4 подсочных канала диаметром 10 мм на глубину 30–40 мм. Высота заложения подсочных каналов – 30–40 см от корневой шейки. Интенсивность соковыделения измеряли с точностью 5 мл через каждые 2 ч, замыкая суточные циклы. Для сравнения результатов измерения выполняли в сухую солнечную и пасмурную погоду. Одновременно подсачивали 16 деревьев с разным диаметром ствола. Для каждого модельного дерева фиксировали начало и окончание соковыделения и тем самым устанавливали его продолжительность. По результатам многолетних исследований (2017–2019 гг.) определяли динамику сокопродуктивности.

Собранные полевые материалы были обработаны методами вариационной статистики с использованием следующего программного обеспечения: Statistica 11 и Microsoft Excel. Для работы с полученными данными применяли корреляционный и дисперсионный анализ [14].

Результаты исследования и их обсуждение

С увеличением диаметра ствола интенсивность соковыделения, как правило, возрастает. Скорость выделения сока зависит также от возраста дерева и степени развития кроны. Во всех случаях деревья с хорошо развитой кроной выделяют больше сока, а при одинаковом диаметре ствола больше сока выделяют более молодые деревья (табл. 1).

Как видно, размах варьирования интенсивности соковыделения значителен, она составляет 40–285 мл/ч. Не всегда максимальная интенсивность соковыделения характерна для деревьев с большим диаметром ствола. Например, модель 2 с диаметром ствола 17 см за единицу времени дает сока в 4 раза больше, чем дерево с диаметром ствола 28 см (модель 9), и в 3 раза больше, чем дерево с диаметром ствола 38 см (модель 14). Следовательно, есть и другие факторы, оказывающие заметное влияние на количество сока, выделяемого одним деревом. В целом зависимость интенсивности соковыделения (Y) от диаметра ствола (x) можно выразить полиномом 2-й степени:

$$Y = 0,6595x^2 - 2,7386x + 107,9400.$$

Коэффициент детерминации (R^2) равен 0,68.

Таблица 1

**Влияние возраста дерева, диаметра ствола и степени развития кроны
на интенсивность соковыделения**
**Influence of tree age, trunk diameter and crown development on the intensity
of sap release**

Номер модели	Диаметр ствола, см	Возраст дерева, лет	Габитус кроны*	Средняя интенсивность соковыделения, мл/ч
1	17	63	–	105
2		54	+	175
3	16	56		–
4		61	60	
5	22	68	–	205
6	24	63		133
7	23	66	+	146
8		73	–	96
9	28	68		+
10	29	58	285	
11		76	157	
12	30	70	99	
13	36	66	–	70
14	38	76		64
15		72		+
16	37	76	–	234

* «+» – деревья с хорошо развитой кроной; «–» – со слабо развитой.

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что при одинаковом диаметре ствола более высокая интенсивность соковыделения характерна для деревьев, возраст которых меньше, например, для моделей 9–11. Проявляется и влияние степени развития кроны дерева на количество выделяемого сока. Например, модели 14–16 имеют практически одинаковый диаметр и одинаковый возраст, но при этом экземпляры с хорошо развитой кроной (протяженность кроны больше, диаметр кроны больше) – модели 15 и 16 – выделяют сока в 3–4 раза больше, чем дерево со слабо развитой кроной – модель 14.

Условно все деревья независимо от их возраста и диаметра ствола по интенсивности соковыделения можно разделить на следующие группы: деревья с максимальной (более 400 мл/ч), минимальной (менее 200 мл/ч) и средней интенсивностью соковыделения.

В отдельные периоды подсочного сезона при положительной среднесуточной температуре (+3... +6 °С) в пасмурную погоду одно дерево за сутки может выделять от 0,54 до 1,37 л сока, а при более высокой температуре в солнечную погоду этот объем увеличивается в несколько раз – от 2,50 до 6,22 л/сут. При температуре воздуха –3,0 °С сок замерзает. Если среднесуточная температура воздуха держится выше +10,0 °С в течение нескольких дней, сок начинает бродить.

В ходе опытных работ установлено, что у деревьев, расположенных в микропонижениях, начало соковыделения запаздывает на 1–3 дня по сравнению с деревьями, которые произрастают на микроповышениях (перепад высот 0,5–1 м). Это связано с различной температурой почвы по элементам микрорельефа. У деревьев в микропонижениях период соковыделения продолжается, независимо от размеров и возраста дерева, на 2–4 дня больше, чем у деревьев на микроповышениях. В общем продолжительность соковыделения деревьями на разных элементах микрорельефа в течение сезона подсочки выравнивается. Установлено, что связь интенсивности соковыделения с температурой почвы теснее, чем с температурой воздуха.

Использование одновременно нескольких подсочных каналов на одном стволе показывает, что выделение сока из каждого канала происходит в своем режиме. Это можно объяснить тем, что при расположении канала над корневой лапой интенсивность соковыделения из него высокая, а если подсочный канал расположен между корневыми лапами, интенсивность соковыделения значительно ниже – модели 9, 12–14 (табл. 2).

Таблица 2

Интенсивность соковыделения в зависимости от количества каналов
The intensity of sap release depending on the number of tapping channels

Номер модели	Количество каналов на стволе	Соковыделение, мл/ч					среднее за 1 ч
		канал					
		1-й	2-й	3-й	4-й		
1	1	105	–	–	–	105	
2	2	75	230	–	–	175	
3	3	130	25	125	–	93	
4	4	75	–	45	90	60	
5	1	205	–	–	–	205	
6	2	125	140	–	–	133	
7	3	250	105	90	–	146	
8	4	103	95	–	90	96	
9	1	40	–	–	–	40	
10	2	290	280	–	–	285	
11	3	165	150	–	–	157	
12	4	53	105	130	110	99	
13	1	70	–	–	–	70	
14	2	43	92	–	–	64	
15	3	240	245	85	–	190	
16	4	103	345	155	330	234	

Примечание: Прочерк означает выпадение данных по разным причинам.

На всех объектах исследования наиболее интенсивное соковыделение у модельных деревьев наблюдали в середине дня в промежутке времени от 13 до 15 ч. С раннего утра и до 13–14 ч интенсивность соковыделения в це-

лом увеличивается, а после 15 ч начинает постепенно снижаться. При этом в среднем за 6 ч 1-й половины дня интенсивность соковыделения несколько меньше, чем средние значения за 6 ч во 2-й половине дня. В ночные и утренние часы отмечается минимальная интенсивность соковыделения у всех модельных деревьев, независимо от диаметра ствола, возраста дерева и степени развития кроны.

При снижении температуры воздуха и почвы минимальные значения интенсивности соковыделения отмечаются во 2-й половине ночи и в утренние часы. Если температура остается стабильной в течение суток, то изменения интенсивности соковыделения за этот период менее выражены, но в дневные часы она выше, а в ночные несколько ниже.

Чем дольше период сокодвигения и процесс подсочки, тем более выражено снижение интенсивности соковыделения. У всех модельных деревьев в начальный период подсочки интенсивность соковыделения максимальная, что видно из данных табл. 3 (здесь представлены модельные деревья с одним подсочным каналом).

Таблица 3

**Динамика соковыделения деревьями с разным диаметром ствола
в начальный период подсочки**
**Dynamics of sap release in the initial tapping period by trees
with different trunk diameters**

Номер модели	Интенсивность соковыделения, мл/мин			
	в течение 1-го часа	через		
		2 ч	3 ч	4 ч
1	7,33	2,33	1,27	0,55
5	7,50	2,67	1,33	0,50
9	6,75	2,33	1,00	0,33
13	7,70			0,70

Самое значительное снижение интенсивности соковыделения наблюдается в течение 1-х суток, в 1-е несколько часов после начала подсочки, что отчетливо видно из табл. 3, а на 2–3-и сутки интенсивность соковыделения стабилизируется и в течение всего периода подсочки остается примерно на одном уровне или слабо снижается.

Корреляционный анализ по критерию Спирмена для 16 случаев показал наличие статистически значимой связи между диаметром дерева и интенсивностью соковыделения и объемом сока в день (табл. 4).

Дисперсионный анализ выявил значительную разницу для классов диаметров дерева и количества каналов по интенсивности соковыделения (табл. 5).

Снижение интенсивности соковыделения в 1-е часы после начала подсочки происходит у всех модельных деревьев практически синхронно. Разный уровень интенсивности соковыделения объясняется неодинаковыми диаметром ствола, степенью развития кроны и возрастом модельных деревьев.

Таблица 4

**Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена R_s
с показателями сокопродуктивности
Spearman's rank correlation coefficients R_s with sap yield indices**

Параметр	R_s	t	p
Степень толщины и интенсивность соковыделения, мл/ч	0,491	2,110	0,053
Степень толщины и объем сока в день, л			
Степень толщины и продолжительность соковыделения, дн.	0,829	6,116	0,001

Таблица 5

**Дисперсионный анализ значимости показателей интенсивности соковыделения
по классам диаметра деревьев березы**

ANOVA analysis of significance of sap intensity indices by birch tree diameter classes

Параметр	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p
Степень толщины и интенсивность соковыделения, мл/ч	0,1621	14	0,0125	0,0019	2	0,0009	12,88	0,05
Степень толщины и продолжительность соковыделения, дн.	93,3030		7,1771	1,1145		0,5572	12,87	

Увеличение интенсивности соковыделения при повышении температуры воздуха и почвы быстрее происходит у деревьев с небольшим диаметром ствола. На 2-е сутки после начала подсочки интенсивность соковыделения стабилизируется и на изменение режима освещенности, температуры воздуха и почвы деревья реагируют более заметно.

Опытные работы, проводимые в течение 4 сезонов, показывают, что продолжительность соковыделения меняется по годам и зависит от погодных условий и других факторов. За 4 года наблюдений совпадений дат начала и окончания соковыделения деревьями березы не установлено. Погодные условия определяют интенсивность, продолжительность соковыделения и общую сокопродуктивность березняка по годам.

Таким образом, интенсивность соковыделения деревьями березы зависит от множества факторов. Главные из них – диаметр ствола, степень развития кроны, тип леса и погодные условия.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на интенсивность соковыделения и сокопродуктивность березы оказывают влияние множество факторов. В качестве основных можно выделить диаметр ствола и степень развития кроны. Интенсивность соковыделения зависит также от температурного режима воздуха и почвы. Сокодвигание у березы, произрастающей на микроповышениях, начинается на 2–3 дня раньше, чем у березы в микропонижениях. Эти факторы необходимо учитывать в первую очередь при планировании работ по заготовке березового сока в промышленных масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Багинский В.Ф., Есимчик Л.Д., Гримашевич В.В., Бурак Ф.Ф., Валова З.Г., Ермонина И.В., Колодий Т.А., Кочановский С.Б., Лапицкая О.В., Неверов А.В., Порошина Л.В., Самусев А.Д., Федоренко О.Н., Шершень Л.И. Комплексная продуктивность земель лесного фонда / под общ. ред. В.Ф. Багинского. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2007. 295 с.
Baginskiy V.F., Esimchik L.D., Grimashevich V.V., Burak F.F., Valova Z.G., Ermonina I.V., Kolodiy T.A., Kochanovskiy S.B., Lapitskaya O.V., Neverov A.V., Poroshina L.V., Samusev A.D., Fedorenko O.N., Shershen L.I. *Integrated Productivity of Forest Lands*. Gomel, Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2007. 295 p. (In Russ.).
2. Грязькин А.В., Любимов А.В., Самсонова И.Д., Хетагуров Х.М., Хунг Ву Ван, Ванджурак Г.В. Сокопродуктивность березы в зависимости от количества подсочных каналов на стволе // Аграрн. науч. журн. 2017. № 6. С. 7–10.
Gryazkin A.V., Lyubimov A.V., Samsonova I.D., Khetagurov Kh.M., Hung Vu Van, Vandzhurak G.V. Productivity of Birch Juice According to the Number of Channels on the Trunk. *The Agrarian Scientific Journal*, 2017, no. 6, pp. 7–10. (In Russ.).
3. Грязькин А.В., Чан Чунг Тхань, Ву Ван Хунг, Прокофьев А.Н., Хоанг Минь Ань. Комплексная оценка сырьевых ресурсов березняков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 23–35.
Gryazkin A.V., Tran Trung Thanh, Vu Van Hung, Prokofyev A.N., Hoang Minh Anh. Integrated Assessment of Raw Material Resources of Birch Forests. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 1, pp. 23–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-23-35>
4. Орлов И.И., Рябчук В.П. Березовый сок. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 56 с.
Orlov I.I., Ryabchuk V.P. *Birch Sap*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 56 p.
5. Патент 2084129 С1 РФ, МПК А 01 G 23/00. Способ учета подроста: № 94022328/13: заявл. 10.06.94: опубл. 20.07.1997 / А.В. Грязькин.
Gryazkin A.V. *Seedling Growth Registering Method*. Patent RF no. RU 2 084 129 C1, 1997. (In Russ.).
6. Правила использования лесов для ведения сельского хозяйства: утв. приказом Мин-ва природн. ресурсов и экологии РФ № 408 от 02.07.2020 г.
Rules for the Use of Forests for Agriculture: Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 408 dated July 2, 2020. (In Russ.).
7. Рябчук В.П. Соковыделение березы и температурные условия // Лесн. хоз-во. 1974. № 5. С. 25–27.
Ryabchuk V.P. Sap Release of Birch and Temperature Conditions. *Lesnoye khozyaystvo*, 1974, no. 5, pp. 25–27. (In Russ.).
8. Хетагуров Х.М., Грязькин А.В., Гуталь М.М., Феклистов П.А. К вопросу об эффективном использовании ресурсов высокогорных кленовников Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10, № 3(37). С. 373–382.
Khetagurov Kh.M., Gryazkin A.V., Gutal M.M., Feklistov P.A. To the Question of the Efficient Resources Use in the Maple Forests Type of the Caucasus. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2018, vol. 10, no. 3(37), pp. 373–382. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2018-10-3-373-382>
9. Хунг Ву Ван, Хетагуров Х.М., Кочкин А.А., Новикова М.А., Тхао До Ванг. Интенсивность выделения березового сока в зависимости от диаметра ствола и габитуса кроны // Аграрн. науч. журн. 2016. № 10. С. 46–49.
Hung V.V., Hetagurov Kh.M., Kochkin A.A., Novikova M.A., Thao D.V. The Release Rate of Birch Juice Depending on the Trunk Diameter and Crown Shape. *The Agrarian Scientific Journal*, 2016, vol. 10, pp. 46–49. (In Russ.).

10. Чунг Чан Тхань, Грязькин А.В., Сырников И.А., Хунг Ву Ван. Ресурсы древесных растений в березняке черничном // Лесотехн. журн. Воронеж. 2020. Т. 10, № 2(38). С. 93–102.

Thanh Chung Chan, Gryazkin A.V., Syrnikov I.A., Hung Wu Wan. Resources of Woody Plants in Myrtillus-Type Birch Forest. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 2(38), pp. 93–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/9>

11. Boxal P.C., Murray G., Unterschultz J.R. Non-Timber Forest Products from the Canadian Boreal Forest: An Exploration of Aboriginal Opportunities. *Journal of Forest Economics*, 2003, vol. 9, iss. 2, pp. 75–96. <https://doi.org/10.1078/1104-6899-00027>

12. Cioacă L., Enescu C.M. Trends in the Evolution of Harvesting of Non-Wood Forest Products in Romania. *Research Journal of Agricultural Science*, 2018, vol. 50(4), pp. 82–86.

13. Enescu C.M. Which are the Most Important Non-Wood Forest Products in the Case of Ialomița County? *AgroLife Scientific Journal*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 98–103.

14. Enescu C.M. Collection and Use of Birch Sap, a Less Known Non-Wood Forest Product in Romania. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 2017, vol. 17, iss. 1, pp. 191–194.

15. Enescu C.M., Dinca L., Crișan V. The Most Important Non-Wood Forest Products from Prahova County. *Revista Pădurilor*, 2018, no. 1, pp. 45–51.

16. Jayaraman K. *A Statistical Manual For Forestry Research*. Bangkok, FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 1999. 231 p.

17. Johansson T. Development of Stump Suckers by *Betula pubescens* at Different Light Intensities. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1987, vol. 2, iss. 1-4, pp. 77–83. <https://doi.org/10.1080/02827588709382447>

18. Klinger W., Hirschelmann R., Suss J. Birch Sap and Birch Leaves Extract – Screening for Antimicrobial, Phagocytosis Influencing, Antiphlogistic and Antipyretic Activity. *Die Pharmazie*, 1989, vol. 44(8), pp. 558–560.

19. Kūka M., Čakste I., Geršebeka E. Determination of Bioactive Compounds and Mineral Substances in Latvian Birch and Maple Saps. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 2013, vol. 67(4-5), pp. 437–441. <https://doi.org/10.2478/prolas-2013-0069>

20. Liu T.X., Zhang S.W. Agroforestry Systems in Northern Temperate Zone and Productive Perspectives. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 304, pp. 253–258. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.304.253>

21. Nygren A., Lacuna-Richman C., Keinänen K., Als L. Ecological, Socio-Cultural, Economic and Political Factors Influencing the Contribution of Non-Timber Forest Products: Case Studies from Honduras and the Philippines. *Small-scale Forestry*, 2006, vol. 5(2), pp. 249–269. <https://doi.org/10.1007/s11842-006-0013-5>

22. Svanberg I., Sđukand R., Łuczaj Ł., Kalle R., Zyryanova O., Dénes A., Papp N., Nedelcheva A., Šeškauskaitė D., Kołodziejska-Degórska I., Kolosova V. Uses of Tree Saps in Northern and Eastern Parts of Europe. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 2012, vol. 81, no. 4, pp. 343–357. <https://doi.org/10.5586/asbp.2012.036>

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

Научная статья

УДК 630*231.324

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-190-201

Совершенствование технологии химического ухода в лесонасаждениях

Е.М. Царев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

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

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

С.Е. Анисимов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-1346-2020](https://orcid.org/0000-0003-3332-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>

Т.А. Кониюхова, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAU-7113-2020](https://orcid.org/0000-0002-3897-560X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3897-560X>

А.В. Кренив, начальник учебно-производственного участка Учебно-опытного лесхоза (филиал ПГТУ), доц.; ResearcherID: [AAV-9373-2021](https://orcid.org/0000-0002-7670-9732),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7670-9732>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; CarevEM@volgatech.net, RukomojnikovKP@volgatech.net[✉], AnisimovSE@volgatech.net, KonyukhovaT.A.@volgatech.net, KrenevAV@volgatech.net

Поступила в редакцию 29.04.21 / Одобрена после рецензирования 15.08.21 / Принята к печати 18.08.21

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с уничтожением малоценных пород лиственных деревьев химическим путем в пользу хвойных. Обсуждаются преимущества и недостатки различных способов избавления от нежелательной растительности. В центре внимания химический уход в молодняках посредством применения арборицидов. При этом учтено, что химические вещества должны обладать избирательной способностью – сильно воздействовать на нежелательные виды растений (вызывать их отмирание) и не действовать на хозяйственно-ценные, быть безопасными для здоровья человека и лесной фауны. Исследован существующий на настоящий момент и используемый на практике способ химического ухода путем введения инъекций арборицида в зарубки на древесных стволах. В качестве альтернативных решений предлагаются устройства, подтвержденные патентами РФ, для проведения указанных видов работ. Принцип действия новых устройств основывается на сверлении древесных стволов с последующим введением инъекции арборицида в зарубки, полученные в результате сверления. Предлагаемые электрофицированные устройства для химического ухода позволяют снизить трудоемкость процесса, уменьшить физическую нагрузку на оператора при работе и переносе устройства, тем самым увеличить производительность труда. Результаты применения предложенных авторами устройств сопоставлены с результатами для устройства «Кобра», которое широко применялось в Советском Союзе, а затем начало использоваться в России. Исследование проведено в молодняках, требующих осуществления химического ухода с целью формирования хозяйственно-целесообразного состава древостоя для его последующего роста. Работы выполнены на территории арендных участков Кокшайского леса и Шулкинского лесничества в Республике Марий Эл. По результатам сравнительного эколого-лесоводственного мониторинга состояния культур хвойных пород после химического ух-

да выявлены преимущества предложенного устройства по сравнению с устройством «Кобра». Материалы статьи могут быть рекомендованы арендаторам при проведении химического ухода главным образом в молодняках.

Ключевые слова: химический уход за лесом, молодняки, арборициды, инъекция арборицидов, заглушающие породы, иньектор, сверление

Благодарности: Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-674).

Для цитирования: Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов С.Е., Конюхова Т.А., Крeнев А.В. Совершенствование технологии химического ухода в лесонасаждениях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 190–201. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-190-201>

Original article

Improving Chemical Maintenance Techniques in Forest Plantations

Evgeniy M. Tsarev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

Konstantin P. Rukomojnikov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081),

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

Sergey E. Anisimov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-1346-2020](https://orcid.org/0000-0003-3332-0927), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>

Tatyana A. Konyukhova, Researcher ID: [AAU-7113-2020](https://orcid.org/0000-0002-3897-560X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3897-560X>

Andrey V. Krenev, Head of the Training and Production Section of the Educational and Experimental Forestry of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education PSTU, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAV-9373-2021](https://orcid.org/0000-0002-7670-9732),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7670-9732>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; CarevEM@volgatech.net, RukomojnikovKP@volgatech.net[✉], AnisimovSE@volgatech.net, KonyukhovaT.A.@volgatech.net, KrenevAV@volgatech.net

Received on April 29, 2021 / Approved after reviewing on August 15, 2021 / Accepted on August 18, 2021

Abstract. This article covers concerns about the elimination of low-value deciduous trees by chemical treatment in favour of conifers. Various methods for removing undesirable vegetation are discussed with an indication of their advantages and disadvantages. Central attention is given to the use of arboricides for the treatment of young growth. It is considered that the chemicals must selectively affect the unfavourable plants, avoid any influence on economically valuable species, and be safe for human health and forest fauna. A practically common method of chemical maintenance was investigated, which includes the injection of arboricides into notches on tree trunks. The authors suggest devices confirmed by the patents of the Russian Federation that are suitable for this purpose. The operational principle is the drilling of the notches with the subsequent injection of arboricide. The proposed mechanical treatment increases productivity by decreasing the complexity of the procedure

as well as the physical load on the operator during handling and moving of the equipment. The investigational results are compared with the properties of the Cobra apparatus, which was widely used in the Soviet Union and later in the Russian Federation. The research was performed in young stands of Kokshaysky Forest and Shulkinskoe Forestry in the Republic of Mari El. The comparative results of ecological and silvicultural monitoring on coniferous conditions after chemical treatment revealed the higher performance of the proposed device over the Cobra apparatus. The material in this article is recommended to forestry operators as a guide for chemical maintenance, mainly in young stands.

Keywords: chemical treatment of stands, young growth, arboricides, arboricide injection, smothering crops, injector, drilling

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No. 075-15-2021-674) and Core Facility Centre «Ecology, Biotechnologies and Processes for Obtaining Environmentally Friendly Energy Carriers» of Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

For citation: Tsarev E.M., Rukomojnikov K.P., Anisimov S.E., Konyukhova T.A., Krenev A.V. Improving Chemical Maintenance Techniques in Forest Plantations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 190–201. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-190-201>

Введение

Рубки ухода – это форма ухода за лесными участками путем удаления из насаждения на разных этапах развития древостоев нежелательных деревьев и создания благоприятных условий для роста лучших перспективных деревьев главных пород. Рубки ухода направлены на формирование высокопродуктивных качественных насаждений. На этапе формирования молодняков рубки ухода могут быть назначены по результатам мониторинга состава и состояния смыкающегося кронами подроста [4, 7].

Высокая трудоемкость рубок ухода не позволяет охватить все нуждающиеся в них объекты. В связи с этим возникла потребность в применении химических средств – арборицидов – для подавления нежелательной древесной растительности. Традиционные методы ухода за лесом (рубки ухода) имеют экологические преимущества перед химическим уходом [19], так как химический уход небезопасен экологически и отрицательно влияет на лесной биогеоценоз [17, 20], но в то же время химический уход входит в число наиболее эффективных, малозатратных и, следовательно, перспективных методов. С помощью современных арборицидов можно всего за одну обработку предотвратить возобновление нежелательной растительности и обеспечить доминирование хозяйственно-ценных пород [16]. Химический уход сокращает затраты на подготовку рабочей силы и оборудования для выполнения работ, обладает высокой эффективностью и небольшой трудоемкостью по сравнению с машинным и механическими способами ухода, а также позволяет предотвратить заглущение хвойных молодняков мягколиственными породами [15]. Он предназначен в основном для применения на этапе формирования молодняков начиная с 1-го шага – осветления.

В основе химического ухода – воздействие на нежелательные деревья в насаждении арборицидами с целью полного или частичного уничтожения таких деревьев, ослабления их роста, снижения конкурентной способности по сравнению с лучшими и вспомогательными деревьями. При кажущейся про-

стоте химический уход за лесом требует особого внимания от лесоводов. Химические вещества должны обладать избирательной способностью: сильно воздействовать на нежелательные растения, вызывая их отмирание, и не действовать на главные породы. Для практического применения рекомендуются только малотоксичные препараты, не накапливающиеся в экосистемах (соли и эфиры 2,4-дихлорафеноксисукусной кислоты (2,4-Д), вельпар, гарлон) [18]. При грамотном применении экологическая безопасность химического метода полностью соответствует современным требованиям [12–14].

В настоящее время остро стоит вопрос формирования ценных лесных массивов на образовавшихся в результате пожаров лета 2010 г. горельниках, где уже смыкаются кроны подроста, формируя лесную среду. Мониторинг состояния молодняков на этих площадях свидетельствует о необходимости проведения осветлений с целью формирования хозяйственно-целесообразного состава молодняков. Происходящие здесь процессы приводят к вегетативному возобновлению лиственных пород и снижению эффективности лесоводственных уходов. Химический метод ухода [1, 3, 5, 6] в отличие от механического удаления нежелательной примеси в составе молодняков позволит не только подсушить кроны лиственных, но и устранить их дальнейшее вегетативное восстановление, тем самым уменьшить количество уходов, необходимых для формирования требуемого состава древостоя.

На сегодняшний день существуют устройства для химического ухода за лесом путем инъекции в ствол. Одним из устройств, представляющих наибольший интерес, является устройство для химического ухода за лесом под названием «Кобра» [9]. Однако недостатками данного устройства являются сложность конструкции, низкая надежность, высокая трудоемкость процесса срезания, большая физическая нагрузка на оператора при работе и переносе устройства. Все перечисленное ведет к снижению производительности труда [2, 8].

Авторами статьи предложены новые устройства [10, 11] для химического ухода за лесом, позволяющие снизить трудоемкость процесса, уменьшить физическую нагрузку на оператора и увеличить производительность труда.

Цель исследования – анализ конструкций предложенных авторами устройств для химического ухода за лесом посредством проведения сравнительного эколого-лесоводственного мониторинга состояния культур хвойных пород после химического ухода в молодняках с применением механизма «Кобра» и предложенных новых технических решений.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стали конструкции устройств для химического ухода за лесом: устройство «Кобра» и новые, предложенные авторами устройства.

Экспериментальные работы проведены в молодняках с преобладанием ели на арендных участках Кокшайского леса и Шулкинского лесничества в Республике Марий Эл. На лесных участках было заложено 25 пробных площадок размером 10×10 м. На каждом участке отработано по 10 стволов берез, из которых 5 стволов – устройством «Кобра» и 5 стволов – предложенным авторами устройством с электрическим аккумуляторным (ручным) приводом режущего инструмента.

Особенностью нового устройства (рис. 1) является следующее. В передней части корпуса 1 Т-образной формы располагаются упоры 2, а также шарнирно размещено сопло 3 для впрыска химического раствора. Внутри нижней части корпуса вмонтирован механизм привода 4 сопла 3. Механизм выполнен в виде зубчато-реечной передачи 5 и связан с силовой установкой 6 и режущим инструментом 7. С левой стороны корпуса есть рукоятка 8 с устройством впрыска 9, который соединен посредством гибкого трубопровода 10 с соплом емкостью 11 для химического раствора, размещенной в верхней части корпуса.

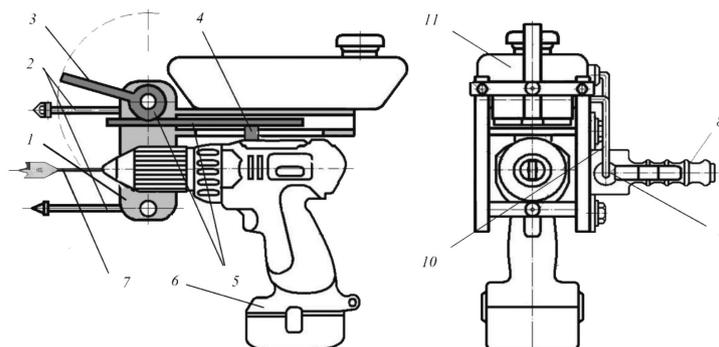


Рис. 1. Устройство для химического ухода за лесом с электрическим приводом

Fig. 1. Device for chemical carding of stands with electric drive

Устройство работает так. Т-образный корпус подносится к растущему дереву, упирается в него упорами, закрепленными в передней части корпуса, посредством рукоятки и силовой установки. После этого включается силовая установка, происходит надвигание ее на дерево, за счет чего происходит сверление отверстия на заданную глубину, ограниченную упорами. При этом сопло поднимается вверх по часовой стрелке под действием зубчато-реечной передачи. Затем силовая установка перемещается от дерева назад при помощи механизма привода, сопло под действием зубчато-реечной передачи опускается вниз против часовой стрелки и устанавливается перед отверстием, сделанным сверлом. Происходит впрыск химического раствора в данное отверстие при помощи механизма впрыска, расположенного на рукоятке. Силовая установка возвращается в исходное положение. Осуществляется переход к другому дереву и цикл повторяется.

Конструкция устройства с ручным приводом режущего инструмента представлена на рис. 2. Данное устройство состоит из корпуса в виде ручной дрели 1 с режущим органом – сверлом 2, к которому в верхней части жестко закреплена пластина 3. По краям пластины размещены ролики 4, входящие в контакт с направляющей 5 Т-образной формы, жестко соединенной с корпусом механизма впрыска химического раствора. Механизм впрыска состоит из емкости 6, сопла 7, гибкого трубопровода 8 и рукоятки 9, а направляющая связана с механизмом возврата, выполненного в виде пружины 10 с упором 11, закрепленном в задней части корпуса дрели.

Устройство работает следующим образом. Ручная дрель подносится к месту сверления отверстия на растущем дереве. Сверление осуществляется до половины диаметра дерева (рис. 2, а). После этого режущий орган возвращается в исходное положение, дрель опускается вниз на величину, равную расстоянию между режущим органом и соплом. Таким образом, сопло оказывается на уровне просверленного отверстия (рис. 2, б). Дрель упирается в ствол растущего дерева режущим органом в целях надежного удержания для последующей

работы. При помощи рукоятки впрыска химического раствора (рис. 2, в) происходит движение корпуса вперед с помощью пластины и роликов по направляющей. Пружина, закрепленная на упоре, растягивается, сопло оказывается в отверстии. По гибкому трубопроводу впрыскивается химический раствор. После этого за счет пружины емкость химического раствора возвращается в исходное положение и сопло выдвигается из отверстия. Осуществляется переход к другому дереву и цикл повторяется.

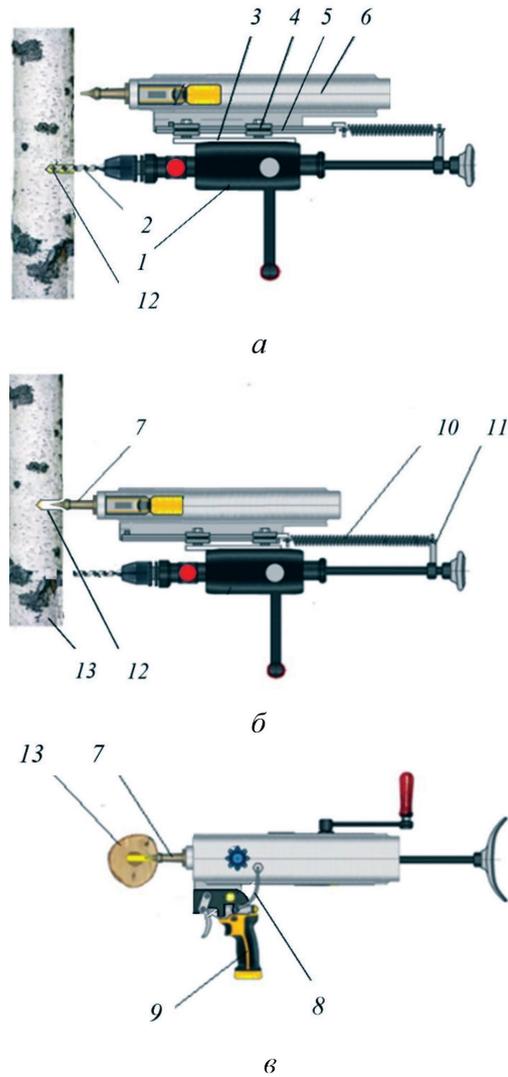


Рис. 2. Устройство с ручным приводом для химического ухода за лесом: а – сверление; б – впрыскивание; в – вид устройства сверху (12 – просверленное отверстие; 13 – растущее дерево)

Fig. 2. Device for chemical carding of stands with a manual drive: а – drilling; б – injection; в – top view of the device (12 – drilled hole; 13 – growing tree)

Для определения положительных качеств предложенных устройств было проведено их сравнение с применяемыми на практике устройствами. Критерием оценки стала продолжительность времени с момента введения инъекции до отмирания деревьев лиственных пород (березы).

Результаты исследования и их обсуждение

Характеристика подлежащих удалению пород на экспериментальных площадках представлена в табл. 1.

Таблица 1

Паспорта кварталов, где проводился химический уход за лесом
Passports of the quarters where chemical carding of stands was conducted

Лесничество, квартал/выдел	Характеристика участка							Ель, за которой проводится уход		Заглушающие породы
	площадь, га	состав	возраст, лет	средняя высота, м	полнота	тип леса; условия произрастания	запас, м ³ /га	количество, тыс. шт./га	средняя высота, м	
Кокшайское, 80/19	0,25	5Е2Б2Ос1С+Лп	Е – 27; Б – 30	Е – 4; Б, Ос – 6; С – 4; Лп – 5	0,7	С _{мчер} ^Б ; В ₃	20	1,700	7	Ос, Б
Куярское (учебно- опытное), 23/8	0,2	7Е2Ос1Ив,	Ос, Ив – 10	Ос, Ив – 4 м	0,7	Е _{лпш}	42	3,063	9	Ос, Ив
Куярское (учебно- опытное), 23/22	0,8	4Е1С2Б	Б – 10	Б – 5	0,7	Е _{лпш}	12	2,974	2	Б
Куярское (учебно- опытное), 30/128	0,3	5Е3Б2Ос	Б, Ос – 12	Б, Ос – 4	0,7	Е _{лпш}	16	3,778	3	Ос, Б
Куярское (учебно- опытное), 60/1	2,1	7Е2Б1Ос	Б, Ос – 20	Б, Ос – 7	0,7	Е _{лпш}	60	3,511	7	Ос, Б
Шулкинское, 57/30	2,8	5Е2Б2ОсИв	Е – 8; Б – 10	Е – 3; Б, Ос, Ив – 4	0,8	Е	14	4,302	3	Б, Ос, Ив

Примечание: С_{мчер} – сосняк майниково-черничный; Е_{лпш} – ельник липово-широколистный; Е – лесные культуры ели.

В табл. 2 сведены данные для экспериментальных исследований. Общим для всех устройств являлся способ обработки – инъекция в ствол дерева.

Таблица 2

Данные для проведения эксперимента

Experimental data

Устройство	Глубина впрыска, мм	Средняя высота впрыска от поверхности земли, см	Препарат (доля препарата и доля воды в растворе)
Кобра	3..5	10...12	Раундап (1:3)
Устройство для химического ухода с электрическим / ручным приводом	½ среднего диаметра ствола	15...20	

На рис. 3 показаны устройство для химического ухода «Кобра» и приемы работы с его использованием на стволе дерева.



а



б

Рис. 3. Устройство для химического ухода «Кобра»: а – общий вид устройства; б – надрез ствола дерева с инъекцией в него химического раствора; в – ствол дерева после впрыска химикатов

Fig. 3. Device Cobra for chemical carding of stands: а – general view of the device; б – incision of a tree trunk with injection of chemical solution; в – tree trunk after injection of chemicals



в

При проведении эксперимента применяли электрофицированный инструмент (рис. 4). На рис. 4 представлен процесс сверления и впрыска химикатов с использованием предлагаемой технологии работ в Шулкинском лесничестве

при проведении осветления (рис. 4, б), а также стволы деревьев после ввода инъекции на участке Кокшайского леса (рис. 4, в).



Рис. 4. Электрофицированный инструмент для химического ухода за лесом: а – общий вид устройства; б – процесс впрыска химикатов; в – ствол дерева после впрыска химикатов

Fig. 4. Device for chemical carding of stands with a rechargeable battery: а – general view of the device; б – incision of a tree trunk with injection of chemical solution; в – tree trunk after injection of chemicals

На рис. 5 схематично показано распространение химического раствора по стволу дерева для случая применения устройства «Кобра» и устройства, предложенного авторами.

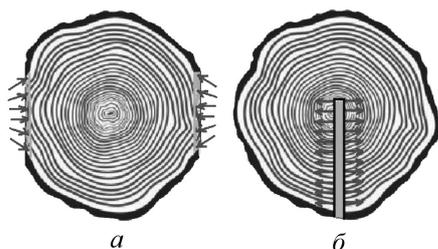


Рис. 5. Распространение химического раствора по годичным кольцам ствола дерева: а – устройство «Кобра»; б – электрофицированный инструмент

Fig. 5. Distribution of the chemical solution along the annual rings of the tree trunk: а – by Cobra device; б – by electrified device

Через 15 дней после проведения опыта наблюдали, что кроны деревьев, обработанных с использованием новых конструкций, полностью усохли (рис. 6, б), в то время как кроны деревьев после обработки «Коброй» стали усыхать постепенно, лишь на вершинах (рис. 6, а). Это объясняется распространением химического раствора по годичным кольцам ствола дерева в случае применения нового устройства (рис. 5, б) и впрыскиванием препарата только во внешнюю часть ствола при использовании инструмента «Кобра» (рис. 5, а).



Рис. 6. Деревья после обработки с использованием: а – устройства «Кобра»; б – новых технических решений

Fig. 6. Trees after the treatments with: а – Cobra device; б – new technical solutions

На рис. 7 показаны экспериментальные результаты осветления с применением предложенного устройства, но уже с использованием препарата Гелиос Экстра, ВР. Из рис. 7 видно, что результаты также положительные.



Рис. 7. Экспериментальные результаты осветления с применением нового устройства и химиката Гелиос Экстра, ВР

Fig. 7. Experimental results of clarification using the new device and the chemical Helios Extra, VR

Заключение

Сравнительный анализ показал, что в результате использования предложенных конструкций устройств снижается трудоемкость процесса осветления, уменьшается физическая нагрузка на оператора при работе и переносе устрой-

ства, за счет чего увеличивается производительность труда, ускоряется процесс угнетения и гибели нежелательных растений – создаются благоприятные условия для увеличения прироста лучших деревьев посредством увеличения освещенности. Кроны угнетающих пород деревьев, обработанных в ходе экспериментальных исследований с применением новых устройств, полностью усохли и не препятствуют проникновению солнечного и дождевого потоков к деревьям перспективных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агафонов П. Химия на уходе за лесом // Лесн. хоз-во. 1962. № 8. С. 71–72.
Agafonov P.A. Chemistry for Forest Care. *Lesnoye khozyaystvo*, 1962, no. 8, pp. 71–72. (In Russ.).
2. Алексеев Г.А. Рекомендации по уходу за молодняками леса инструментом «Кобра». Йошкар-Ола, 2009. 40 с.
Alekseev G.A. *Recommendations for the Care of Young Stands by the Cobra Device*. Yoshkar-Ola, 2009. 40 p. (In Russ.).
3. Антропова Г.А., Омеляненко А.Я. Применение касоронадихлобенила для ухода за посадками ели // Химический уход за лесом. Псков: Лениздат, Псков. отд-ние, 1973. С. 53–58.
Antropova G.A., Omelyanenko A.Ya. Application of Casoronadichlobenil for the Care of Spruce Seedlings. *Chemical Forest Care*. Pskov, Lenizdat, Pskovskoye otdeleniye Publ., 1973. pp. 53–58. (In Russ.).
4. Атрохин В.Г., Иевинь И.К. Рубки ухода и промежуточное лесопользование. М.: Агропромиздат, 1985. 255 с.
Atrokhin V.G., Ievin I.K. *Thinning and Intermediate Forest Maintenance*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 255 p. (In Russ.).
5. Багаев С.Н. Рост древесных пород при различных условиях их затенения в молодняках // Изв. вузов. Лесн. журн. 1963. № 5. С. 21–24.
Bagaev S.N. Growth of Tree Species Under Different Shading Conditions in Young Stands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1963, no. 5, pp. 21–24. (In Russ.).
6. Бельков В.П., Омеляненко А.Я., Щепашченко Г.Л. Перспективы химического ухода в лесных полосах // Лесн. хоз-во. 1971. № 8. С. 43–44.
Belkov V.P., Omelyanenko A.Ya., Schepashchenko G.L. Prospects for Chemical Treatment in Forest Clearings. *Lesnoye khozyaystvo*, 1971, no. 8, pp. 43–44. (In Russ.).
7. Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4(32). С. 34–46.
Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. Quadrocopter Practical Application for Forest Regeneration Monitoring. *Vestnik of Volga State University of Technology, Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2016, no. 4(32), pp. 34–46. (In Russ.). [doi.10.15350/2306-2827.2016.4.34](https://doi.org/10.15350/2306-2827.2016.4.34)
8. Крнев А.В. Технические решения для химического ухода за лесом // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: Материалы Всерос. студ. конф., Йошкар-Ола, 23–28 нояб. 2015 г.: 8 ч. Ч. 2. Идеи и решения для инновационного развития лесных и лесоперерабатывающих технологий. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. С. 79–81.
Krenev A.V. Technical Solutions for Chemical Forest Care. *Engineering Personnel – the Future of Russia's Innovative Economy: Proceedings of the All-Russian Student Conference, Yoshkar-Ola, November 23–28, 2015. In 8 parts. Part 2: Ideas and Solutions for*

the Innovative Development of Forest and Wood Processing Technology. Yoshkar-Ola, PSTU Publ., 2015, pp. 79–81. (In Russ.).

9. Патент №2236780 С2 РФ, МПК А01G 23/02, А01G 23/00, А01М 21/02. Устройство для химического ухода за лесом: № 2001127055/12: заявл. 04.10.2001: опубл. 27.09.2004 / Г.А. Алексеев, Ю.Г. Алексеев.

Alekseev G.A., Alekseev Yu.G. *A Device for Chemical Forest Maintenance*. Patent RF, no. 2236780 C2, 2004. (In Russ.).

10. Патент №2633795 С1 РФ, МПК А01G 23/00. Устройство для химического ухода за лесом: № 2017101764: заявл. 19.01.2017: опубл. 18.10. 2017 / Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, А.В. Кренев, Ю.А. Коновалова.

Anisimov S.E., Tsarev E.M., Krenev A.V., Konovalova Yu.A. *A Device for Chemical Forest Maintenance*. Patent RF, no. 2633795 C1, 2017. (In Russ.).

11. Патент № 2690471 С1 РФ, МПК А01G 23/00. Устройство для химического ухода за лесом: № 2018118677: заявл. 22.05.2018: опубл. 03.06.2019 / Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, В.М. Заболотский, Т.А. Конюхова, А.В. Кренев, Ю.А. Коновалова, Н.С. Анисимов, И.С. Анисимов.

Tsarev E.M., Anisimov S.E., Zabolotsky V.M., Konyukhova T.A., Krenev A.V., Konovalova Yu.A., Anisimov N.S., Anisimov I.S. *A Device for Chemical Forest Maintenance*. Patent RF, no. 2690471 C1, 2019. (In Russ.).

12. Ahmad Faiz M.A. Efficacy of Glyphosate and Its Mixtures Against Weeds Under Young Rubber Forest Plantation. *Journal of Rubber Research*, 2006, vol. 9, iss. 1, pp. 50–60.

13. Gehring K., Thyssen S., Fester T. Einfluss der Applikation mit abdriftreduzierten Dusen auf Wirksamkeit von Herbizidbehandlungen. *Z. Pflanzenkrankh, Pflanzenschutz*, 2006, iss. 20, pp. 233–240. (In German).

14. Muro-Sune N., Gani R., Bell G., Shirley I. Predictive Property Models for Use in Design of Controlled Release of Pesticides. *Fluid Phase Equilibria*, 2005, vol. 228-229, pp. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2004.08.007>

15. Papiernik S.K., Yates S.R., Koskinen W.C., Barber B. Processes Affecting the Dissipation of the Herbicide Isoxaflutole and Its Diketonitrile Metabolite in Agricultural Soils Under Field Conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, vol. 55, no. 21, pp. 8630–8639. <https://doi.org/10.1021/jf071256s>

16. Primol S., Valantiu-Morison M., Makowski D. Predicting the Risk of Weed Infestation in Winter Oilseed Rape Crops. *Weed Research*, 2006, vol. 46, no. 1, pp. 22–33. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00489.x>

17. Sanemitsu Y., Kawamura S., Satoh J., Katayama T., Hashimoto S. Synthesis and Herbicidal Activity of 2-Acylimino-3-Phenyl-1,3-Thiazolines. A New Family of Bleaching Herbicides. *Journal of Pesticide Science*, 2006, vol. 31, no. 3, pp. 305–310. <https://doi.org/10.1584/jpestics.31.305>

18. Schulte U., Michel A. Vergleichende Nutzenbetrachtung ausgewählter Breitband herbizide. *Z. Pflanzenkrankh, Pflanzenschutz*, 2006, iss. 20, pp. 667–674. (In German).

19. Schulte-Dauk V. Neue Produkte und Strategien für kommende Saison. *Getreide Mag.*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 198–201. (In German).

20. Wang M., Mu X., Guo W., Li Y., Li Z. Synthesis and Herbicidal Activity of Novel 5-Substituted Benzenesulfonylureas. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2007, vol. 23, no. 6, pp. 674–678. [https://doi.org/10.1016/S1005-9040\(07\)60146-9](https://doi.org/10.1016/S1005-9040(07)60146-9)

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: 10.37482/0536-1036-2023-4-202-214

Оценка перспектив развития предприятий лесного хозяйства Республики Башкортостан

С.А. Коньшакова, канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: [AID-3055-2022](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3523-1488>

Н.А. Булхов, канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: [AAQ-6710-2021](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0373-374X>

А.Н. Заикин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Z-3172-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

С.Г. Кузнецов, канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: [HSH-3456-2023](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-2732>

В.В. Сиваков[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-7264-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; gler@bk.ru, pismaanick@mail.ru, zaikin.anatolij@yandex.ru, pro-econom@bgitu.ru, sv@bgitu.ru[✉]

Поступила в редакцию 30.04.21 / Одобрена после рецензирования 10.08.21 / Принята к печати 14.08.21

Аннотация. Высокий уровень энерговооруженности и технической обеспеченности лесозаготовок наряду с передовыми технологиями обеспечивают конкурентоспособность предприятия. Вместе с тем сегодняшнее состояние материально-технической базы организаций лесного хозяйства регионов является, как правило, неудовлетворительным. Значительная технико-технологическая отсталость материально-технической базы обусловлена спецификой современной организации лесного хозяйства. С целью обеспечения эффективности производственной деятельности организаций лесного хозяйства регионов на основе повышения уровня энерговооруженности и технической обеспеченности лесозаготовок необходимо проведение соответствующих исследований. Методологические основы оценки леса как экосистемы являются актуальным направлением теоретических и прикладных исследований. В мировой и отечественной практике при оценке природных ресурсов используют 3 основных подхода: сравнительный, затратный и доходный. Применение методологии стоимостной оценки к природным ресурсам позволяет получить гибкую систему показателей с возможностью оценить природные ресурсы в зависимости от объема доступной информации и практических целей. С позиций пространственной экономики нами предлагается разработать пилотный проект повышения эффективности производственной деятельности государственных автономных учреждений лесного хозяйства Республики Башкортостан. Проект призван дать практические рекомендации по выделению 2–3 групп организаций лесного хозяйства в зависимости от их рейтинга. Для оценки рейтинга лесхозов нами использован экспертный подход. В его основу положены оценки, данные нами ранее предприятиям лесного хозяйства Республики Башкортостан (государственные автономные учреждения). Значения количественных критериев включают оценки экспертов и статистическую информацию из различных источников, таких как отчеты, справочники, результаты обследований, опросов и т. п. Критерии были разбиты на 2 группы: количественные (наличие лесозаготовительной техники, транспортная до-

© Коньшакова С.А., Булхов Н.А., Заикин А.Н., Кузнецов С.Г., Сиваков В.В., 2023

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

ступность, расчетная лесосека) и качественные (состояние лесозаготовительной техники, ремонтная база и организация управления). По результатам интегральной оценки лесхозы распределены по 4 группам. На основании выполненной оценки целесообразно выделить «точек роста» при реализации пилотного проекта материально-технической модернизации предприятий лесного хозяйства.

Ключевые слова: лесозаготовки, лесное хозяйство, оценка деятельности лесхозов, материально-техническая база предприятий, пространственная экономика, Республика Башкортостан

Для цитирования: Коньшакова С.А., Булхов Н.А., Заикин А.Н., Кузнецов С.Г., Сиваков В.В. Оценка перспектив развития предприятий лесного хозяйства Республики Башкортостан // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 202–214. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-202-214>

Original article

Assessment of the Development Potential of Forestry Enterprises of the Republic of Bashkortostan

Svetlana A. Konshakova, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AID-3055-2022](https://orcid.org/0000-0002-3523-1488), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3523-1488>

Nikolay A. Bulkhov, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAQ-6710-2021](https://orcid.org/0000-0002-0373-374X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0373-374X>

Anatoliy N. Zaikin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Z-3172-2019](https://orcid.org/0000-0002-1831-6893),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Sergey G. Kuznetsov, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [HSH-3456-2023](https://orcid.org/0000-0003-4617-2732), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-2732>

Vladimir V. Sivakov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; glr@bk.ru, pismaanick@mail.ru, zaikin.anatolij@yandex.ru, pro-econom@bgitu.ru, sv@bgitu.ru[✉]

Received on April 30, 2021 / Approved after reviewing on August 10, 2021 / Accepted on August 14, 2021

Abstract. The high level of power supply and technical provision of logging, along with advanced technologies, ensure the enterprise's competitiveness. The current state of facilities and resources at forestry institutions in the regions is, as a rule, unsatisfactory. Significant engineering and technological backwardness of facilities and resources is due to the specifics of the modern structure of the forest sector. With the purpose of ensuring the production effectiveness of forestry institutions in the regions on the basis of increasing the level of power supply and technical provision for logging, it is necessary to carry out appropriate research. The methods for assessing the forest as an ecosystem are a relevant area of theoretical and applied research. There are 3 basic methods used in world and Russian practice in the assessment of natural resources: comparative, cost, and income. The methodology of cost estimate for natural resources provides a flexible system of indices, which allow assessing natural resources depending on the amount of available information and practical purposes. In terms of spatial economics we propose to develop a pilot project to improve the efficiency of production in the state autonomous forestry institutions of the Republic of Bashkortostan. The

project is intended to provide practical guidance on the allocation of 2–3 groups of forestry institutions. We used an expert approach to assess the rating of forestries. Our earlier estimates for forestry enterprises in the Republic of Bashkortostan (state autonomous institutions) were used as the basis for it. The values of quantitative criteria include expert estimates and statistical information from numerous sources, such as reports, handbooks, results of surveys, interviews, etc. The criteria were divided into 2 groups: quantitative (availability of logging equipment, transport accessibility, calculated logging area) and qualitative (state of the logging equipment, repair depot, and management structure). According to the results of the integral assessment, the forestries are divided into 4 groups. Based on the assessment performed, it is advisable to identify the points of growth in the pilot project of modernization the facilities and resources of forestry enterprises.

Keywords: logging, forestry, assessment of forestry's performance, facilities and resources of enterprises, spatial economics, Republic of Bashkortostan

For citation: Konshakova S.A., Bulkhov N.A., Zaikin A.N., Kuznetsov S.G., Sivakov V.V. Assessment of the Development Potential of Forestry Enterprises of the Republic of Bashkortostan. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 202–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-202-214>

Введение

Одним из видов деятельности предприятий лесного хозяйства, наряду с работами по воспроизводству лесов, их защите и охране, является обеспечение объемов и качества процесса лесозаготовок. Анализ требований к основным факторам развития такой деятельности показывает, что существует необходимость широкого внедрения новых, высокопроизводительных технических систем, машин и оборудования для бережного использования лесных земель.

Стремление к достижению конкурентоспособности лесного хозяйства обуславливает необходимость достаточно высокого уровня энерговооруженности, а также технической обеспеченности всех выполняемых предприятиями лесного хозяйства функций, начиная с создания, защиты, охраны и воспроизводства лесов и заканчивая лесозаготовками. Однако текущее состояние материально-технической базы организаций лесного хозяйства регионов в области лесозаготовок является преимущественно неудовлетворительным.

Статья основывается на данных полевого исследования, проведенного в 2018 г. [3] на предприятиях государственных автономных учреждений лесной отрасли (бывших лесхозах) Республики Башкортостан. Целью было изучение возможности увеличения объемов лесозаготовок этих предприятий для обеспечения необходимыми объемами древесного сырья производственной деятельности ООО «Кроношпан Башкортостан», заключившего в 2012 г. инвестиционное соглашение с Республикой на открытие завода по деревообработке и выпуску строительных материалов.

Несмотря на ощутимое уменьшение объемов производства в РФ лесных машин, продукция отечественного лесного машиностроения все еще преобладает на российских лесозаготовительных предприятиях. При этом степень ее износа превышает критическое значение. Так, уже в 2007 г. уровень износа парка лесных машин приближался к 100 % [1]. Усугубляет данную ситуацию и то, что машиностроительные заводы практически перестали выпускать запасные части для данной техники. Если в 1990 г. Онежский тракторный завод выпу-

скал более 10 тыс. гусеничных тракторов, то в 2019 г. изготовил только 18 шт. Аналогичная картина наблюдается, к большому сожалению, и на других отечественных заводах по выпуску лесохозяйственной техники [7].

Как показали проведенные исследования, в бывших лесхозах Республики Башкортостан (государственные автономные учреждения) [3], за редким исключением, отсутствует необходимая техника, используются изношенные машины, часто собранные из нескольких.

На лесозаготовительных предприятиях России преобладает сортиментная заготовка [2, 7, 8, 13, 18–20, 24, 26], а на главных рабочих операциях (валка, обрезка сучьев, раскряжевка), как правило, применяются бензомоторные пилы. В то же время за рубежом основные объемы древесины заготавливаются при помощи харвестеров [11, 12, 15–17, 21–23]. Высокая технико-технологическая отсталость материально-технической базы обусловлена спецификой современной организации лесного хозяйства в РФ.

Функционирование любой отрасли производства должно учитывать как внутреннюю экономическую специфику, связанную с номенклатурой выпускаемой продукции, так и внешние факторы (экономические, природоохранные, экологические, социальные, правовые и др.) [4]. Специфика лесного хозяйства проявляется как в обладании и управлении лесом в качестве недвижимого имущества, так и в процессе лесохозяйственного производства:

- лес является воспроизводимым природным ресурсом с длительным процессом производства;

- лес выступает как предмет, продукт и средство труда;

- при соблюдении лесоводственных правил создаются условия для его восстановления;

- лес характеризуется многофункциональным значением;

- лесохозяйственное производство осуществляется по сезонам;

- лесное хозяйство необходимо вести на огромных территориях;

- при осуществлении управления лесами и лесохозяйственного производства нужно учитывать разнообразие лесорастительных и лесоэкономических условий [4].

Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» в части целей разработки и реализации национальных проектов в сфере экологии актуализирует необходимость сохранения лесов на основе их воспроизводства. Исполнителем и разработчиком законодательных инициатив в данной сфере является Министерство природных ресурсов РФ. С 2019 г. начали принимать законопроекты, направленные на улучшение состояния лесного хозяйства и, как следствие, лесопромышленного сектора экономики страны в целом. Так, например, на арендаторов лесных участков возлагается обязанность создания в течение года покрытой лесом площади, равной вырубленной. Кроме того, повышается юридическая ответственность за предоставление должностными лицами недостоверной информации о состоянии лесных фондов в субъектах РФ.

Достижение приоритетных целей сохранения и эффективного использования лесов обуславливает необходимость совершенствования в том числе научно-методического обеспечения и способов оценки состояния и эффектив-

ности деятельности организаций лесного хозяйства в контексте принципов пространственной экономики.

Методический подход к оценке деятельности организации лесного хозяйства в современных условиях должен быть направлен на анализ не только финансово-хозяйственной деятельности и имущественного положения лесхоза, но и ресурсной базы лесопользования и возможностей развития организации лесного хозяйства.

На основе информации о текущем состоянии государственных автономных учреждений лесной отрасли Республики Башкортостан нами предлагается разработать проект повышения эффективности их производственной деятельности, который призван дать практические рекомендации по выделению 2–3 групп организаций лесного хозяйства:

ведущие, которые являются локомотивами отрасли, выполняют пилотные функции в использовании методов и приемов работы и на базе которых производится апробация управленческих и технологических решений;

постепенно внедряющие и развивающие опыт пилотных организаций лесного хозяйства с учетом специфики своего материально-технического обеспечения и ресурсной базы, уровня развития инфраструктуры;

отстающие, требующие реорганизации или ликвидации в рамках общей структуры развития лесного хозяйства региона.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено для территории Республики Башкортостан. Леса охватывают 30 % земель региона. Лесопокрытая территория характеризуется неодинаковыми экологическими факторами, обеспечивающими сосуществование сообществ от остепненных лиственничников до ольхово-черемуховых уремников и разнообразие ландшафтов. Лесистость территории Республики составляет около 40 %. При этом наблюдаются значительные колебания показателя: от 6,2–9,1 (остепняющиеся районы – Давлекановский, Стерлитамакский, Благоварский и Куюргазинский) до 81,2–92,0 % (горно-лесная зона – Белорецкий район). Горные леса, выполняющие важные почвозащитные, водорегулирующие и водоохранные функции, занимают более 3/4 площади лесов региона. Площадь земель лесного фонда, находящихся в ведении Федерального агентства лесного хозяйства на территории Республики Башкортостан, по состоянию на 1 января 2022 г., равняется 3,618 млн га. Общий запас древесины в этих лесах – 538,96 млн м³, в том числе спелых и перестойных насаждений – 332,92 млн м³. Из общего запаса древостои с преобладанием хвойных пород составляют 167,44 млн м³, из них спелых и перестойных – 58,12 млн м³.

Объектами исследования являются государственные автономные учреждения лесного хозяйства (бывшие лесхозы) Республики Башкортостан.

Основу подхода к оценке предприятий лесного хозяйства с позиций пространственной экономики должны составлять принципы учета лесоресурсной базы, пространственного размещения и логистики, материально-технического обеспечения объекта оценки. Практическая реализация принципов в рамках единой методики возможна при комбинации специальных методов оценочной деятельности с методами математического моделирования, картографии и экспертной оценки.

Принцип учета лесоресурсной базы организаций лесного хозяйства позволит принять во внимание при планировании стратегии развития конкретного предприятия лесного хозяйства и лесного хозяйства региона, породный состав лесов, их ценность. Методологические основы оценки леса как экосистемы являются актуальным направлением теоретических и прикладных исследований. При этом оценка природных ресурсов должна учитывать множество различных факторов, так как одни и те же природные ресурсы имеют разные области использования [10].

Как в мировой, так и в отечественной практике оценки природных ресурсов существуют 3 подхода: сравнительный, затратный и доходный. Применение методологии стоимостной оценки в области природных ресурсов позволяет получить гибкую систему показателей, оценивающих природные ресурсы в зависимости от объема доступной информации и целей использования. Система учитывает показатели 3 типов: рассчитанные на основе затратных методов (по воспроизводственной стоимости объекта), на основе доходного метода (по величине рентного дохода) и на основе совокупности затрат на освоение и доходов от использования природных ресурсов [5].

В.В. Печаткин предлагает эколого-экономическую оценку лесного потенциала с учетом выполняемых лесами полезных функций. По его мнению, «лесной потенциал региона как объект экономического, экологического и правового регулирования представляется в виде социо-эколого-экономической системы, для каждого компонента которой государству надлежит установить обязательные правила, обеспечивающие устойчивое, неистощимое лесопользование» [6, с. 31]. Лесной потенциал рассматривается В.В. Печаткиным как совокупность экологических, социальных функций и лесных ресурсов, отражающихся в конечном итоге на величине лесной ренты. Данная методика применима для оценки лесных ресурсов региона в целом, однако не учитывает организационные аспекты эффективности территориально-пространственного размещения лесозаготовительных предприятий.

Применение принципа учета пространственного размещения и логистики объекта оценки позволит увязать качественные и породные характеристики лесного потенциала с возможностью организации процесса лесозаготовок, выбором технологии и оборудования. Важными факторами эффективности лесозаготовок являются наличие достаточных объемов сырья, инфраструктура и развитая транспортная сеть. Географическая разбросанность, ярко выраженная сезонность производства и зависимость от почвенно-грунтовых условий определяют специфику лесозаготовок. Потребность проектирования сезонных зон лесозаготовительного производства обусловлена необходимостью снижения эксплуатационных и капитальных затрат как на строительство дорог, так и на производство в целом. Целесообразна разработка методики сезонного районирования, позволяющая обосновать отнесение лесных площадей к тому или иному сезону лесозаготовок, учитывающая климатические особенности региона и эксплуатационные характеристики лесных насаждений. Как отмечает В. Суханов, «проблема освоения лесосек с переувлажненными грунтами (трелевка древесины) технически весьма сложная. В настоящее время в мире нет подобной лесной техники. Что касается строительства лесовозных дорог круглогодочного действия – это, в основном, задача экономического характера.

Высокая стоимость строительства лесовозных дорог также связана с неблагоприятными характеристиками грунтов в российских лесах. На территориях со слабыми и переувлажненными грунтами редки месторождения дорожно-строительных материалов. Большие расстояния доставки дорожно-строительных материалов отрицательно влияют на стоимость строительства. В этих условиях перед предприятиями стоит задача выбрать экономически наиболее доступные технологии строительства лесовозных дорог из местных строительных материалов» [9, с. 29].

Принцип учета материально-технического обеспечения позволит оценить достаточность для процесса лесозаготовок технических средств, машин и оборудования, сформировать единый подход к организации лесозаготовок, ремонтного хозяйства на местах, повысить полезное использование оборудования или разработать план обновления материально-технической базы лесозаготовительного производства в регионе.

Обобщение данных принципов посредством рейтинговой оценки позволит, по нашему мнению, выделить в региональном разрезе организации лесного хозяйства, способные стать «точками роста» для реализации пилотного проекта эффективного освоения лесов. Выделение организаций – точек роста – заключается в выборе на основе авторской рейтинговой оценки наиболее перспективных государственных автономных учреждений.

Результаты исследования и их обсуждение

Для формирования рейтинга использован экспертный подход. В его основу положены оценки, данные нами состоянию материально-технической базы государственных автономных учреждений лесного хозяйства Республики Башкортостан [3, 25].

Интегральные экспертные оценки (рейтинги) рассчитаны в такой последовательности:

1. Определены критерии, влияющие на решения о предпочтительности того или иного лесхоза. Критерии разделены на 3 группы: количественные, качественные и релейные («да»/«нет»). Такое распределение позволяет использовать различные подходы при расчете интегральных оценок для конкретного лесхоза.

2. Для каждого критерия рассчитаны весовые коэффициенты ω_i , определяющие степень влияния отдельно взятого критерия на интегральную оценку. Весовые коэффициенты получены как для количественных, так и для качественных критериев. При этом значимость критериев учтена по формуле:

$$\omega_i = \frac{2(N - i + 1)}{N(N - i + 1)}, \quad i = \overline{1, N},$$

где i – ранг, или балл, который был присвоен i -му критерию; N – число критериев.

Значения количественных критериев включают оценки экспертов и данные из различных источников информации, таких как отчеты, справочники, результаты обследований, опросов и т. п.).

3. Количественные критерии обработаны в соответствии с методами квалитметрии:

построены таблицы, где в горизонтальных строках указаны критерии, а в столбцах – значения критериев a_{ij} для каждого из предприятий лесного хозяйства;

для каждого параметра в зависимости от влияния критериев на общую оценку определено эталонное значение – максимальное или минимальное;

при выборе наибольшего эталонного значения $a_{i\max}$ все значения данной строки поделены на него, результаты занесены в таблицу

$$a_{ij}^* = a_{ij} / a_{i\max};$$

при выборе наименьшего эталонного значения $a_{i\min}$ эталонное значение поделено на другие значения данной строки, результаты занесены в таблицу

$$a_{ij}^* = a_{i\min} / a_{ij}.$$

Чтобы получить оценки для качественных критериев мы воспользовались функцией желательности, значения которой рассчитываются по формуле:

$$\alpha_i = \exp(-\exp(-y_i)),$$

где y_i – значение i -го параметра на кодированной шкале.

Значение y_i на кодированной шкале располагается симметрично относительно 0. Средние и граничные значения функции желательности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки качества и соответствующие им стандартные оценки по шкале желательности [14]

Quality assessment and corresponding standard desirability scale scores [14]

Интервал	Оценка качества	Отметка на шкале желательности	
		диапазон	среднее значение
3,1–4,0	Отлично	<0,951	0,975
2,1–3,0	Очень хорошо	0,876...0,950	0,913
1,1–2,0	Хорошо	0,691...0,875	0,782
0,1–1,0	Удовлетворительно	0,368...0,690	0,530
(–1,0)–0,0	Плохо	0,067...0,367	0,285
(–2,0)–(–1,1)	Очень плохо	0,001...0,066	0,033
(–3,0)–(–2,1)	Наихудший результат	>0,001	–

Функция желательности дает возможность привести качественные оценки показателей к количественным оценкам, в интервале 0,1–1,0 для тех и других. Качественные оценки унифицируются относительно максимальных значений по строкам.

На основании проведенного нами исследования и анализа его результатов были сформированы критерии интегральной оценки и их ранги (1–8):

Расчетная лесосека, тыс. м ³	1
Эффективность организации управления.....	2
Состояние лесозаготовительной техники.....	3
Наличие лесозаготовительной техники, шт.	4
Автомобильная транспортная сеть (до Уфы), км.....	5
Расстояние до железной дороги, км.....	6
Расстояние до Уфы по железной дороге, км.....	7
Ремонтная база предприятия.....	8

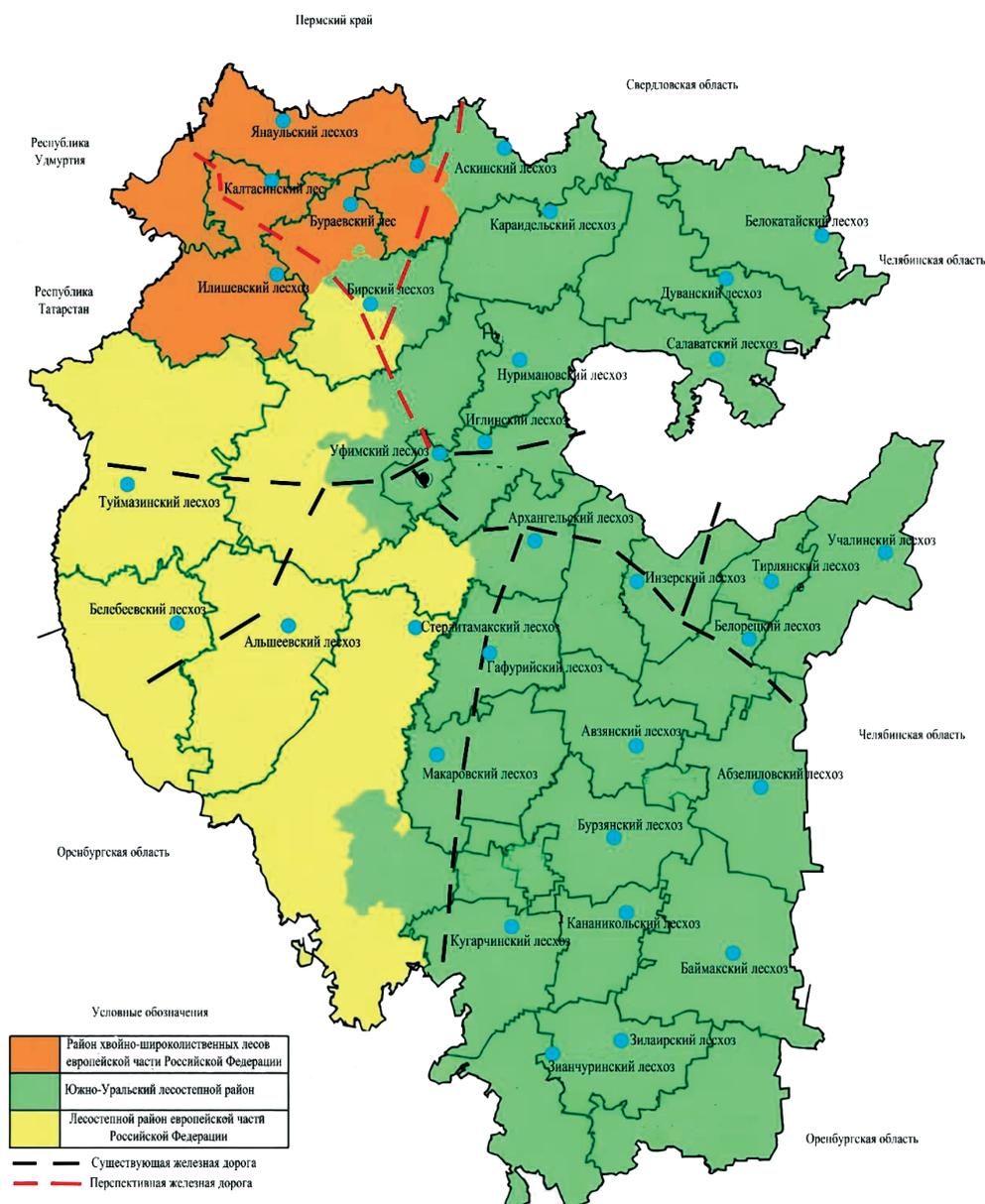
Критерии разбиты на 2 группы: количественные (наличие лесозаготовительной техники, транспортная доступность, расчетная лесосека) и качественные (состояние лесозаготовительной техники, ремонтная база и эффективность организации управления). Результаты интегральной оценки лесхозов, а также их распределение по группам представлены в табл. 2.

Таблица 2

Интегральная оценка рейтинга лесхозов Республики Башкортостан
Integral rating of forestries of the Republic of Bashkortostan

Лесхоз / автономное учреждение	Оценка	Рейтинг	Группа
Стерлитамакский	0,734	1	Высокий рейтинг
Макаровский	0,673	2	
Белебеевский	0,671	3	
Нуримановский	0,642	4	
Иглинский		5	
Архангельский	0,638	6	
Зилаирский	0,634	7	
Белокатайский	0,610	8	Средний рейтинг
Янаульский	0,602	9	
Дуванский	0,596	10	
Гафурийский	0,579	11	
Караидельский	0,568	12	
Салаватский	0,559	13	
Аскинский	0,536	14	
Баймакский	0,521	15	
Инзерский	0,519	16	Низкий рейтинг
Авзянский	0,509	17	
Бурзянский	0,454	18	
Туймазинский	0,448	19	
Альшеевский	0,442	20	
Абзелиловский	0,432	21	
Илишевский	0,429	22	
Бураевский лес	0,428	23	Очень низкий рейтинг
Кананикольский	0,395	24	
Уфимский	0,385	25	
Кугарчинский	0,375	26	
Бирский	0,361	27	
Зианчуринский	0,360	28	
Белорецкий	0,319	29	
Тирлянский		30	
Учалинский	0,307	31	
Калтасинский лес	0,293	32	

На основании выполненной оценки считаем целесообразным выделение лесхозов – «точек роста» при реализации пилотного проекта материально-технической модернизации: Зилаирский и Стерлитамакский (лесостепная лесорастительная зона Южно-Уральского лесостепного лесного района), Янаульский (лесорастительная зона хвойно-широколиственных лесов Европейской части РФ) и Белебеевский (лесостепная лесорастительная зона лесостепного района Европейской части РФ). Причина такого выбора как рейтинговая оценка предприятия (рейтинг не ниже 0,6), так и отдаленность одного предприятия от другого (с целью максимально возможного охвата территории Республики) и привязка к сети железной дороги – существующей и перспективной (см. рисунок).



Распределение лесхозов по территории Республики Башкортостан

Distribution of forestries on the map of the Republic of Bashkortostan

Заключение

В результате проведенной оценки государственных автономных учреждений лесной отрасли (бывших лесхозов) Республики Башкортостан на основе методического подхода с позиций пространственной экономики в целях анализа возможности обеспечения древесиной ООО «Кроношпан Башкортостан» сформулированы критерии интегральной оценки. Критерии были разбиты на количественные (наличие лесозаготовительной техники, транспортная доступность, расчетная лесосека) и качественные (состояние лесозаготовительной техники, ремонтная база и эффективность организации управления). Исследование позволило установить:

современное состояние данных учреждений не дает возможности обеспечить ООО «Кроношпан Башкортостан» древесиной в требуемых объемах;

для повышения эффективности производственной деятельности государственных автономных учреждений лесного хозяйства необходимо обеспечение их современной лесозаготовительной техникой;

для проверки принятых решений требуется создание пилотных предприятий для модернизации их материально-технической базы на основе 4 лесхозов с учетом их высокого рейтинга и территориального размещения – максимально возможного охвата территории Республики Башкортостан и привязки к сети железной дороги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьев И., Кацадзе В. Состояние и перспективы развития лесного машиностроения в России // ЛесПромИнформ. 2015. № 2(108). С. 80–82.

Grigorev I.V., Katsadze V.A. The State and Development Potential of Forest Engineering in Russia. *LesPromInform*, 2015, no. 2(108), pp. 80–82. (In Russ.). <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4002>

2. Дербин В.М., Дербин М.В. Сортиментная заготовка древесины при выборочных рубках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 5. С. 123–131.

Derbin V.M., Derbin M.V. Cut-to-Length Method in Selective Felling. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2016, no. 5, pp. 123–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.5.123>

3. Заикин А.Н., Коньшакова С.А., Сиваков В.В., Кузнецов С.Г., Булхов Н.А. Технологический ресурс лесозаготовительной техники лесхозов Республики Башкортостан // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 123–133.

Zaikin A.N., Konshakova S.A., Sivakov V.V., Kuznetsov S.G., Bulkhov N.A. Technological Resources of Harvesting and Logging Machinery of Bashkortostan Forestries. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 4, pp. 123–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-123-133>

4. Ильин В. Основы построения экономической организации лесного хозяйства РФ // ЛесПромИнформ. 2017. № 2(124). С. 20–28.

Ilyin V.A. Fundamentals of Deartmentation of Forestry Economic Entity in the Russian Federation. *LesPromInform*, 2017, no. 2(124), pp. 20–28. (In Russ.). <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4603&>

5. Логинов В.Г., Косолапов О.В. Экономическая оценка земельных ресурсов: теоретико-методологический аспект // Журн. экономической теории. 2011. № 2. С. 104–114.

Loginov V.G., Kosolapov O.V. Economic Evaluation of Land Resources: Theoretical and Methodological Aspect. *Russian Journal of Economic Theory*, 2011, no. 2, pp. 104–114. (In Russ.).

6. Печаткин В.В. Методологические и прикладные вопросы эколого-экономической оценки лесного потенциала регионов России // Региональная экономика: теория и практика. 2013. № 3(282). С. 49–54.

Pechatkin V.V. Methodological and Applied Issues of Ecological and Economic Assessment of Forest Potential of the Russian Regions. *Regional Economics: Theory and Practice*, 2013, no. 3(282), pp. 49–54. (In Russ.).

7. Пискунов М.А. Особенности российского рынка лесозаготовительной техники // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 132–147.

Piskunov M.A. Features of the Harvesting and Logging Equipment Market in Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 6, pp. 132–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-132-147>

8. Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107.

Rukomojnikov K.P., Mokhirev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 4, pp. 94–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.94>

9. Суханов В., Новоселов И. Модернизация лесозаготовительной промышленности – стратегическая задача ЛПК России // ЛесПромИнформ. 2017. № 3(125). С. 26–30.

Sukhanov V., Novoselov I. Modernization of the Logging Industry is a Strategic Task of the Russian Timber Industry. *LesPromInform*, 2017, no. 3(125), pp. 26–30. (In Russ.). <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4637>

10. Татаркин А.И., Логинов В.Г. Методологические вопросы оценки леса как экосистемы // Управленец. 2014. № 6(52). С. 4–9.

Tatarikin A.I., Loginov V.G. Methodological Issues of Assessing Forest as an Ecosystem. *Upravlenets = The Manager*, 2014, no. 6(52), pp. 4–9. (In Russ.). <https://upravlenets.usue.ru/images/52/52.pdf>

11. Bettinger P., Kellogg L.D. Residual Stand Damage from Cut-to-Length Thinning of Second Growth Timber in the Cascade Range of Western Oregon. *Forest Products Journal*, 1993, vol. 43(11/12), pp. 59–64.

12. Camp A. Damage to Residual Trees by Four Mechanized Harvest Systems Operating in Small Diameter, Mixed Conifer Forests and Steep Slopes in Northeastern Washington: A Case Study. *Western Journal of Applied Forestry*, 2002, vol. 17, pp. 14–22. <https://doi.org/10.1093/wjaf/17.1.14>

13. Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Pobedinsky V.V., Terinov N.N., Urazova A.F. Improving the Efficiency of Multifunctional Machines for Intensive Forestry. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 138–149. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-138-149>

14. Harrington E.C. The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 1965, vol. 21, no. 10, p. 494–498.

15. Hartsough B. Economics of Harvesting to Maintain High Structural Diversity and Resulting Damage to Residual Trees. *Western Journal of Applied Forestry*, 2003, vol. 18, iss. 2, pp. 133–142. <https://doi.org/10.1093/wjaf/18.2.133>

16. Iskandar H., Snook L.K., Toma T., MacDicken K., Kanninen M. A Comparison of Damage Due to Logging Under Different Forms of Resource Access in East Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 237, iss. 1–3, pp. 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.079>

17. Majnounian B., Jourgholami M., Zobeiri M., Fegghi J. Assessment of Forest Harvesting Damage to Residual Stands and Regenerations – a Case Study of Namkhaneh District in Kheyroud Forest. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, vol. 7, pp. 33–44.
18. Mokhirev A., Rukomojnikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Development of Methodological Foundations for the Design of Logging Infrastructure Taking into Account the Dynamically Changing Environment. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 500–504. <https://doi.org/10.5937/jaes0-25227>
19. Rukomoinikov K., Mokhirev A., Burgonutdinov A., Kunickaya O., Voronov R., Grigorev I. Network Planning of the Technological Chain for Timber Land Development. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 407–414. <https://doi.org/10.5937/jaes0-28819>
20. Rukomojnikov K.P. Structuring of Loading Points and Main Skid Road in Conditions of Existing Road Network in Forest Compartment. *Journal of Applied Engineering Science*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 167–174. <https://doi.org/10.5937/jaes13-8866>
21. Tavankar F., Bonyad A.E., Majnounian B. Affective Factors on Residual Tree Damage During Selection Cutting and Cable-Skidder Logging in the Caspian Forests, Northern Iran. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 83, pp. 505–512. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2015.07.018>
22. Tavankar F., Bonyad A.E., Majnounian B., Iranparast Bodaghi A. Investigation on the Damages to Residual Trees by Ground-Based Logging System (Case Study: Asalem-Nav Forest Area). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 2010, vol. 17, pp. 57–72.
23. Tavankar F., Majnounian B., Bonyad A.E. Felling and Skidding Damage to Residual Trees Following Selection Cutting in Caspian Forests of Iran. *Journal of Forest Science*, 2013, vol. 59(5), pp. 196–203. <https://doi.org/10.17221/53/2012-JFS>
24. Yakimovich S.B., Teterina M.A. Ways of Conservation the Natural Environment and the Intensification of Logging Round Timber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, art. no. 032026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032026>
25. Zaikin A.N., Sivakov V.V., Bulkhov N.A., Konshakova S.A., Kuznetsov S.G. The Use of Logging Machinery Sets in the Republic of Bashkortostan. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 139–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-139-152>
26. Zyryanov M., Medvedev S., Mokhirev A. Study of the Possibility of Using Logging Residue for the Production of Wood Processing Enterprises. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 15–18. <https://doi.org/10.5937/jaes18-22611>

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

«Лесной журнал» публикует научные статьи по всем отраслям лесного дела, сообщения о внедрении законченных исследований в производство, о передовом опыте в лесном хозяйстве и лесной промышленности. Предназначается для научных работников, инженеров лесного хозяйства и лесной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов.

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ № 4

Подписной индекс: 70368

Главный редактор В.И. Мелехов

Выпускающий редактор И.В. Кузнецова, редактор Д.С. Орлова
Компьютерная верстка О.В. Деревцовой, Е.Б. Красновой
Перевод Е.В. Ольсен

Сдан в набор 28.04.2023. Подписан в печать 05.07.2023. Выход в свет 02.08.2023. Заказ № 8361
Форм. бум. 70×108 1/16. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 18,118.
Уч.-изд. л. 12,711. Тираж 69 экз. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
Адрес учредителя и издателя: 163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17

Адрес редакции: 163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17, ауд. 1425
тел./факс: +7 (8182) 21-61-18, forest@narfu.ru, <http://lesnoizhurnal.ru/>

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-68484 от 27.01.2017.
Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Отпечатано в Издательском доме им. В.Н. Булатова САФУ
Адрес типографии: 163060, г. Архангельск, ул. Урицкого, 56

© «Известия вузов. Лесной журнал», 2023

Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal) publishes scientific articles covering all areas of forestry and provides readers with the use of completed research in production and on the best practices in forestry and forest industry. The journal is intended for scientists, engineers in forestry and forest industry, lecturers, postgraduate students and students.

LESNOY ZHURNAL (RUSSIAN FORESTRY JOURNAL) no. 3

Subscription index: 70368

Editor-in-Chief V.I. Melekhov

Executive Editor I.V. Kuznetsova, Editor D.S. Orlova
Make-up by O.V. Derevtsova, E.B. Krasnova
Translator E.V. Olsen

Sent to the printer's 28.04.2023. Signed in print 05.07.2023. Released on 02.08.2023. Order no. 8361
Paper format 70×108 1/16. Times Font. Conv. printer's sh. 18.118.
Acad. publ. sh. 12.711. Circulation 69 copies. Free price.

Founder and Publisher: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
Address of the Founder and Publisher: Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002

Address of the Editorial Office: Office 1425, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17,
Arkhangelsk, 163002, Russian Federation
Phone/fax: +7 (8182) 21-61-18, forest@narfu.ru, <http://lesnoizhurnal.ru>

The mass media registration certificate ПИ № ФС77-68484 issued on 27.01.2017.

Printed at the NArFU Publishing House named after V.N. Bulatov
Address of the Publishing House: ul. Uritskogo, 56, Arkhangelsk, 163060, Russian Federation



© Lesnoy Zhurnal, 2023



190
лет

Лесной журнал

Подписка на II полугодие 2023 г.
на «Лесной журнал» принимается по каталогам
ОАО «АРЗИ», Объединенный каталог «Пресса России»
(индекс 70368);
ООО «Урал-Пресс Округ» (индекс 70368).

Адрес редакции: 163002, Россия,
г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.
Тел./факс: (8182) 21-61-18
e-mail: forest@narfu.ru

ISSN 0536-1036
DOI:10.37482/0536-1036
Известия вузов. Лесной журнал, №4, 1–214