

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

2

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

2

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

<i>М.Д. Мерзленко.</i> «Лесному журналу» – 190 лет: вехи истории и значимость журнала.....	9
--	---

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>А.А. Дерюгин, Н.А. Рыбакова, Ю.Б. Глазунов.</i> Динамика структуры популяции ели под пологом березняков южной тайги и смешанных лесов в европейской части России.....	15
<i>P.A. Feklistov, A.N. Sobolev, N.A. Babich, N.R. Sungurova, V.I. Melekhov, I.N. Bolotov.</i> Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga.....	26
<i>С.А. Шавнин, И.А. Юсупов, А.А. Монтиле, Д.Ю. Голиков, Н.В. Марина.</i> Сезонная динамика содержания компонентов антиокислительной системы хвой сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) в зоне локального теплового воздействия.....	38
<i>О.С. Барзут, М.В. Сурсо.</i> Радиальный рост ели (<i>Picea abies</i> (L.) Karst. × <i>P. obovata</i> Ledeb.) в условиях горных разработок.....	58
<i>А.А. Агеев, Ю.В. Салцевич, Л.В. Буряк.</i> Комплексное применение биостимуляторов при выращивании семян ели (<i>Picea obovata</i> L.).....	73

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>П.Б. Рябухин, О.А. Куницкая, О.И. Григорьева.</i> Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ.....	88
<i>В.С. Прокопец, В.Г. Козлов, А.В. Скрыпников, Н.Г. Пономарева, Д.М. Левушкин, Ю.А. Боровлев.</i> Математическое обоснование сопротивления движению автотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных дорог.....	106

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>В.Н. Ермолин, М.А. Баяндин, А.В. Намятов, В.А. Острякова.</i> Структурно-механические свойства гидродинамически активированной древесной массы в аддитивных технологиях.....	121
<i>А.С. Торопов, В.Е. Бызов.</i> Морфологический анализ и оптимизация технологического процесса продольного раскроя круглых лесоматериалов...	132

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

- Х.М. Кхоа, Я.В. Казаков, Е.О. Окулова.* Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле..... 146

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- М.А. Загородский, С.В. Третьяков, С.В. Контев.* Плотность древесины сосны обыкновенной в осушаемом сосняке сфагновом..... 160
- Ю.В. Подрезов.* Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций..... 172
- S.S. Makarov, E.S. Bagaev, A.I. Chudetsky, I.B. Kuznetsova, O.P. Lebedeva, A.M. Antonov.* Features of Triploid Aspen Clonal Micropropagation Using Modern Growth-Stimulating Preparations..... 183
- Д.В. Черник, Е.В. Авдеева, К.Н. Черник, Н.Л. Ровных.* Анализ воздействия ветровой нагрузки на каркас теплицы для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой..... 195
-



CONTENTS

<i>M.D. Merzlenko.</i> «Russian Forestry Journal» – 190 Years Old: Milestones in History and Significance of the Journal.....	9
---	---

FORESTRY

<i>A.A. Deryugin, N.A. Rybakova, Y.B. Glazunov.</i> Dynamics of the Spruce Population Structure Under the Canopy of Birch in Coniferous-Deciduous and Southern Taiga Forests of European Russia.....	15
<i>P.A. Feklistov, A.N. Sobolev, N.A. Babich, N.R. Sungurova, V.I. Melekhov, I.N. Bolotov.</i> Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga.....	26
<i>S.A. Shavnin, I.A. Yusupov, A.A. Montile, D.Yu. Golikov, N.V. Marina.</i> Seasonal Dynamics of Content of Antioxidant System Components in Needles of Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) Trees Situated in the Local Warming Impact Zone.....	38
<i>O.S. Barzut, M.V. Surso.</i> Radial Growth of Spruce (<i>Picea abies</i> (L.) Karst. × <i>P. obovata</i> Ledeb.) in the Conditions of Mining Impact.....	58
<i>A.A. Ageev, Yu.V. Saltsevich, L.V. Buryak.</i> Integrated Application of Biostimulants in Cultivation of Siberian Spruce Seedlings (<i>Picea obovata</i> L.).....	73

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>P.B. Ryabukhin, O.A. Kunitskaya, O.I. Grigorieva.</i> Substantiation of Technological Processes and Machinery Systems for Logging Operations.....	88
<i>V.S. Prokopets, V.G. Kozlov, A.V. Skrypnikov, N.G. Ponomareva, D.M. Levushkin, Yu.A. Borovlev.</i> Mathematical Justification of Vehicular Traffic Resistance in Relation to Structural Surface Conditions of Hauling Roads.....	106

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>V.N. Ermolin, M.A. Bayandin, A.V. Namyatov, V.A. Ostryakova.</i> Structural and Mechanical Properties of Hydrodynamically Activated Wood Pulp in Additive Technologies.....	121
<i>A.S. Toropov, V.E. Byzov.</i> Morphological Analysis and Optimization of Technological Process for Rip Cutting of Round Timber.....	132

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

- H.M. Khoa, Ya.V. Kazakov, E.O. Okulova.* Features of Changing Structural and Morphological Properties of Bamboo Pulp Duning Refining..... 146

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- M.A. Zagorodski, S.V. Tretyakov, S.V. Koptev.* Density of Scots Pine Wood in Drained Sphagnum Pine Forest..... 160
- Yu. V. Podrezov.* Principal Directions for Prevention of Emergency Fire Situations in Forests..... 172
- S.S. Makarov, E.S. Bagaev, A.I. Chudetsky, I.B. Kuznetsova, O.P. Lebedeva, A.M. Antonov.* Features of Triploid Aspen Clonal Micropropagation Using Modern Growth-Stimulating Preparations..... 183
- D.V. Chernik, E.V. Avdeeva, K.N. Chernik, N.L. Rovnykh.* Analysis of Wind Load Effect on Greenhouse Frame for Cultivation Seedlings with Closed Root System..... 195
-

УДК 630*902

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-9-14

«Лесному журналу» – 190 лет: вехи истории и значимость журнала

«Лесной журнал» – одно из старейших периодических значимых изданий в России. За 190 лет он прошел долгий путь развития и был связан с именами многих выдающихся деятелей русской лесоводственной науки. Особо необходимо выделить Г.Ф. Морозова и И.С. Мелехова, существенно поднявших в разные периоды статус «Лесного журнала». «Лесной журнал» возник благодаря «Обществу поощрения лесного хозяйства». На рубеже XIX–XX вв. он издавался Императорским Вольным экономическим обществом, а с 1958 г. и по настоящее время выходит в серии «Известия высших учебных заведений».

До XIX в. отраслевых журналов не было – специальные вопросы лесной науки освещались в общей периодической печати, где наряду с прочими вопросами науки, литературы, искусства и общественной жизни давались разрозненные отрывочные сведения о различных исследованиях, об удивительных явлениях в природе. Материалы в таких изданиях публиковались без системы и специального отбора. Нередко в статьи и заметки из области естественных наук помещались и лесоводственные сведения. Из числа периодических изданий, в которых встречаются отдельные статьи лесоводственного и лесотехнологического характера, надо отметить следующие: «Календарь, или Месяцеслов» (издавался с 1728 по 1769 г.), «Сочинения и переводы, к пользе и увеселению служащие» (1755–1762 гг.), «Ежемесячные сочинения и известия о ученых делах» (1763–1764 гг.), «Новые ежемесячные сочинения» (1768–1796 гг.), «Технологический журнал» (1804–1826 гг.), «Commentarii Academiae Imperialis Scientiarum Petropolitanae» (1726–1775 гг.), «Memoires de Academie Imperiale des Sciences de St.-Petersbourg» (с 1814 г.), «Beitrag zur Pflanzenkunde des Russischen Reiches» (1844–1859 гг.), «Известия Императорской Академии наук» (с 1894 г.), «Записки Императорской Академии наук» (1862–1911 гг.), «Труды Ботанического музея Императорской Академии наук» (с 1902 г.), «Природа» (с 1912 г.) и др. Значительная часть статей по лесоводству печаталась на страницах «Трудов Вольного экономического общества» (с 1765 г.), «Сельского жителя» (с 1778 г.), «Экономического магазина» (1780–1789 гг.).

Исторически именно основанному в 1832 г. императором Николаем I «Обществу для поощрения лесного хозяйства» было предназначено создать первый лесохозяйственный печатный орган – «Лесной журнал». Уже сам статус Общества предполагал необходимость издания особого журнала по части лесного хозяйства. На десятом заседании Общества 16 декабря 1832 г. президент организации предложил по составленному коллежским советником фон Фоком проекту приступить в 1833 г. к изданию журнала. Была создана специальная комиссия. Ее положительное решение утверждено на одиннадцатом заседании Общества 27 января 1833 г. И уже 16 мая 1833 г. цензор А. Крылов дал дозволение на печать первого номера «Лесного журнала». Символично, что на обложку поместили изображение древнеримского бога Сильвана – хранителя лесов и нив.



Выб. Каз. Губ. 32м.

№

5 7 5 И З Д А Н И
А Г О Ж У Р Н А Л А
В Ъ 1 8 4 0 Г О Д У .

Лесной Журналъ, издаваемый съ 1835 года Высочайше утвержданнымъ Обществомъ для поощренія леснаго хозяйства, будетъ продолжаться и въ 1840 году, по следующей программѣ:

I. ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫЯ НАУКИ. — 1. Лесоисчисленіе. 2. Лесоохраненіе. 3. Лесная Таксация или Лесоучрежденіе. 4. Лесная Таксация или Лесоисчисленіе. 5. Лесоуправленіе.

II. ЛЕСНАЯ СТАТИСТИКА И ГЕОГРАФІЯ. — 1. Провѣдка сборныхъ лесовъ и составленіе статистическихъ описаній оныхъ. 2. Статистическія свѣдѣнія о лѣсахъ отечественныхъ и иностранныхъ. 3. Обстоятельства, препятствующія распространенію и разсадкѣ растений на земной поверхности.

III. ЛЕСОИЗМѢРЕНІЕ. — Изслѣденіе прѣдѣлъ и удобовѣрныхъ способовъ измѣрять лѣсовъ, и притомъ прѣдѣлы Геодезіи и Ситуаціи.

IV. ИЗОБРЕТЕНІЯ И ОТКРЫТІЯ. — Описаніе лѣсовыхъ орудій и разныхъ изобрѣженій и открытій по лѣсной части.

V. ЕСТЕСТВЕННЫЯ НАУКИ. — 1. Ботаника, преимущественно Лесная. 2. Зоологія: описаніе животныхъ, насекомыхъ или вредныхъ для лѣсовъ, и составляющихъ предметъ охоты. 3. Минералогія: органохимическое и физическое изслѣденіе породъ, и свойствъ оныхъ. 4. Химія: собственноручныя химическія изслѣденія лѣсныхъ породъ и изслѣдованіе химическаго состава лѣсовыхъ породъ. 5. Физика: о прѣдѣлахъ Климатологіи, Астрономіи и Метеорологіи.

VI. САДОВОДСТВО. — 1. Разведеніе, обрѣженіе и наученіе садовъ и изслѣдованіе оныхъ. 2. Приемы прѣдѣлы садоводства въ лесоводствѣ.

VII. НАБЛЮДЕНІЯ ВЪ ОТЕЧЕСТВѢ. — Свѣдѣнія о опытѣхъ дѣланныхъ въ Россіи по части лесоводства и садоводства, объ управленіи леснаго хозяйства.

VIII. СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО. — Слѣди о прѣдѣлахъ оного, изслѣденіи ближайшаго связи съ лесоводствомъ.

IX. ОХОТА. — Описаніе охотничьихъ орудій, разныхъ способовъ ловли и разныхъ животныхъ, равно прѣдѣлы до чегосего искусства отношенія, замѣчательныя случаи и охотничьи анекдоты.

X. КРИТИКА И БИБЛИОГРАФІЯ. — 1. Библиографическія свѣдѣнія и критическія замѣчанія, Русскія и иностранныя о всѣхъ сочиненіяхъ, изданныхъ въ Россіи, и изслѣденіи оныхъ.

XI. СМЕСЬ. — Описаніе разныхъ предметовъ изслѣденій. Свѣдѣнія о трудныхъ ученыхъ обществъ по части лесоводства, садоводства и Естественныхъ Наукъ. Вспомогательныя и прѣдѣлы свѣдѣній, изслѣдованій и естественныхъ наукъ. Заданія по части лесоводства и садоводства. Дисциплинарныя предписанія, прѣдѣлы свѣдѣній, изслѣдованій, и другія статьи, которыя признаны будутъ полезными и не будутъ въ состояніи раздражать оныхъ.

Обложка «Лесного журнала», издававшегося «Обществомъ для поощренія леснаго хозяйства»

«Лесной журнал» в XIX и XX вв. красной нитью вписан в развитие, становление и расцвет отечественной лесной науки. До 1844 г., когда журнал издавался «Обществомъ для поощренія леснаго хозяйства», редакторомъ былъ сначала Юханцевъ, а потомъ – Ланге. Наряду с переводными статьями и заметками, появился ряд самобытныхъ и оригинальныхъ статей российскихъ лесоводов – фон Левиса, Н.Г. Мальгина, Г. Гаффельдера, А.Е. Теплохова, А.Р. Воргаса де Бедемара и др. Общий подбор статей осуществлялся в соответствии со следующими темами: 1) лесохозяйственные науки; 2) лесная статистика и географія; 3) лесоизмереніе; 4) изобретенія и открытія; 5) естественные науки; 6) садоводство; 7) наблюденія в Отечестве; 8) сельское хозяйство; 9) охота; 10) критика и библиографія; 11) смесь.

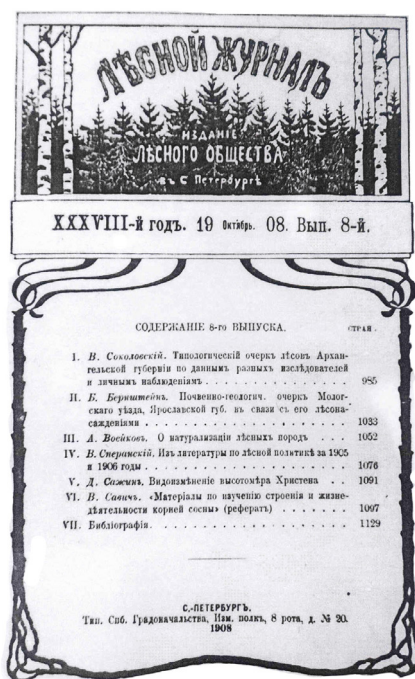
Пожалуй, самым «продуктивнымъ» корреспондентомъ «Леснаго журнала» былъ старшій учитель, а потомъ профессоръ лесныхъ законовъ и лесной статистики, лесоохраненія, егерскаго искусства, энтомологіи, биологіи птицъ и зоологіи, а также лесной таксации Леснаго института В.С. Семеновъ. С 1834 по 1846 г. в «Лесномъ журнале» было опубликовано 68 самыхъ разнообразныхъ статей этого автора, среди которыхъ 20 посвящены лесной таксации и лесоустройству, 18 – лесовосстановленію и лесной энтомологіи, 10 – лесной географіи и статистикѣ, 4 – физиологіи растений, ботаникѣ и почвовѣденію.

На протяженіи 1845–1851 гг. «Лесной журналъ» издавался Императорскимъ Вольнымъ экономическимъ обществомъ. Редакторомъ являлся Ф. Арсеньевъ, а постоянными сотрудниками – А.А. Длатовскій и Ф.К. Арнольдъ. Программа журнала включала разделы «Леса и лесоводство в Россіи», «Леса и лесоводство в иностранныхъ государствахъ», «Библиографія», «Смесь». В цели журнала в этотъ периодъ входило распространеніе в Россіи представленія о рациональномъ лесномъ хозяйствѣ и мотивированіе к его изученію. Былъ поставленъ рядъ важныхъ какъ практическихъ, такъ и научныхъ лесоводственныхъ вопросовъ, показано направленіе ихъ решенія, что в итоге способствовало развитію леснаго дела.

ва, Я.С. Медведева, Д.М. Кравчинского, Ф.К. Арнольда, В.И. Гомилевского, К.Ф. Тюрмера, В.Т. Собичевского, В.Я. Добровлянского, А.А. Крюденера, Г.Н. Высоцкого и многих других. Этот период развития журнала знаменует собой полное становление отечественной лесной науки и ее практического применения.

С 1905 г. редактором «Лесного журнала» становится Г.Ф. Морозов, что наложило большой и своеобразный отпечаток на содержание издания, его профессиональный и общественный вес. Этот период по праву можно назвать расцветом «Лесного журнала». На первом месте программы журнала Г.Ф. Морозов поставил пункт: оригинальные статьи по всем отраслям лесного хозяйства. Журнал, по мнению Г.Ф. Морозова, должен освещать вопросы лесоведения и лесоводства, экономики лесного хозяйства и его организации, а также политики лесного хозяйства. С 1906 г. журнал стал выходить 10 раз в год вместо 6, а его тираж к 1915 г. поднялся с 500 до 2000 экз. В качестве приложения к «Лесному журналу» было начато издание «Материалов по изучению русского леса».

В статьях морозовского периода существования журнала развивалось учение о типах насаждений, поднимались вопросы лесоведения и лесного



Обложка «Лесного журнала» 1908 г.

опытного дела, о принципах и методах регулирования лесопользования, вопросы социального порядка. Стали появляться статьи по ботанике, аграрным и экономическим проблемам, рецензии на книги. Столь разнообразная тематика не замедлила сказаться на проявлении к журналу интереса не только широких кругов работников леса, но и работников смежных областей.

С начала XX в. отмечается лесотипологическая направленность журнала. Появляются оригинальные статьи Н.К. Генко, А.С. Рожкова, А.А. Битриха, П.П. Серебренникова, А.А. Крюденера и др. Особо выделяется в ряду этих статей работа Г.Ф. Морозова «О типах насаждений и их значении в лесоводстве» (1904 г.), где учение о типах насаждений подразумевает как классификационная система лесов.

В журнале морозовского периода публиковались статьи авторов, представлявших цвет русского лесного дела в области науки и практики, – самого Г.Ф. Морозова, М.М. Орлова, Г.Н. Высоцкого, Д.Н. Кайгородова, Д.М. Товстолеса, В.Д. Огиевского, Н.С. Нестерова и многих других. Барон А.А. Крюденер, один из наиболее активных последователей Г.Ф. Морозова, на основе обширных собственных материалов фундаментальных исследований и массового обобщения народных знаний о взаимосвязях между лесом и почвой создал первую в мире научно-обоснованную классификацию типов леса. Она была опубли-

кована в 5-м выпуске журнала за 1914 г. и как уже обширная монография в 3–5-м выпусках «Материалов по изучению русского леса».

На должности главного редактора Г.Ф. Морозов выполнял огромнейшую работу: более 10 лет он не только руководил изданием «Лесного журнала», но и при отсутствии у Лесного общества средств на приглашение специальных лиц для корректуры, улаживания вопросов по расчету с типографией, оформлению различных документов и т. д. бескорыстно исполнял всю эту работу. С 1906 г. журнал снова стал выходить 6 раз в год, а в 1918 г. в результате революционных событий и гражданской войны его выпуск был прекращен.

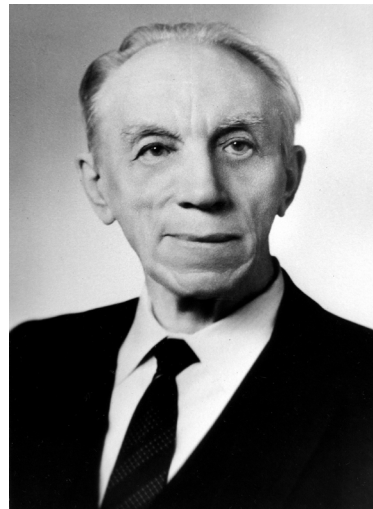
На протяжении четырех последующих десятилетий постоянно высказывалась мысль о необходимости возрождения «Лесного журнала». И в 1958 г. он стал издаваться под своим историческим названием в г. Архангельске Министерством высшего образования СССР в серии «Известия высших учебных заведений». Во многом возрождению и становлению «Лесного журнала» во второй половине XX в. мы обязаны действенной инициативе академика И.С. Мелехова. С 80-х гг. XX в. и до последних лет жизни он был главным редактором «Лесного журнала».

Несмотря на то, что в XXI в. лесная тематика представлена такими журналами, как «Лесотехнический журнал» (издается в Воронеже), «Сибирский лесной журнал» (издается в Красноярске), «Лесной вестник / Forestry Bulletin» (издается МГТУ им. Н.Э. Баумана), а также отчасти многими сельскохозяйственными журналами, «Лесной журнал» не потерял своей значимости. Он уважаем отечественными и мировыми научными сообществами.

Продолжая и развивая лучшие традиции, накопленные за 190 лет существования, современный «Лесной журнал» охватывает все направления лесного хозяйства, лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, освещает экологические проблемы. «Лесной журнал» входит в перечень изданий, рекомендуемых ВАК для публикации научных статей соискателей ученых степеней, включен в реестры международных баз данных: Emerging Sources Citation Index (Web of Science Core Collection), Russian Science Citation Index (RSCI), Ulrichsweb Global Serials Directory, EBSCO, AGRIS, Chemical



Г.Ф. Морозов (1867–1920 гг.)



И.С. Мелехов (1905–1994 гг.)



Abstracts Service, Index Copernicus (ICI), CABI Forest Science Database, J-Gate, China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Norwegian Centre for Research Data (NSD), EuroPub, InfoBase Index, JournalTOCs, Scilit.

Обложка первого номера возрожденного в 1958 г. «Лесного журнала»

М.Д. Мерзленко, д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.;
Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское,
Московская обл., Россия, 143030; root@ilan.ras.ru



Научная статья

УДК 630.182.21:630.231.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-15-25

Динамика структуры популяции ели под пологом березняков южной тайги и смешанных лесов в европейской части России

А.А. Дерюгин[✉], канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAJ-7600-2021](https://orcid.org/0000-0002-2897-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2897-5841>

Н.А. Рыбакова, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAI-8908-2021](https://orcid.org/0000-0002-4978-9001),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4978-9001>

Ю.Б. Глазунов, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [J-1298-2016](https://orcid.org/0000-0001-9427-9740),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9427-9740>

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, Одинцовский р-н, Московская обл., Россия, 143030; da45@mail.ru[✉], 1986620@gmail.com, yu.b.glazonov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.21 / Одобрена после рецензирования 22.06.21 / Принята к печати 24.06.21

Аннотация. Проведено сравнительное изучение демулационного процесса в производных березняках с подпологовой популяцией ели в условиях хвойно-широколиственного (Московская область, Можайский район) и южно-таежного (Ярославская область, Рыбинский район) лесных районов европейской части России. Актуальность исследования обусловлена отсутствием единого мнения о результатах естественного хода сукцессионных процессов в мелколиственных насаждениях с подпологовой популяцией ели. Работы выполнены на постоянных пробных площадях, заложенных в высокополнотных кислично-черничных березняках Iа класса бонитета, находящихся в начале и в конце стадии зрелости (60–80 лет). Рассмотрена динамика возрастной и вертикальной структур подпологовой популяции ели и парцеллярной структуры насаждения в течение 20-летнего периода. Установлено, что основу формирующихся подпологовых популяций ели составляет поколение, появившееся в березняках до достижения ими 30-летнего возраста. Возрастная структура популяции ели, структура по периоду возобновления и процессы отпада деревьев в начале и конце стадии зрелости березняка практически однотипны. В зоне смешанных лесов вертикальная структура популяции ели характеризуется относительно более ранним по сравнению с популяцией в южной тайге началом формирования 2-го яруса ели. Формирование 2-го яруса подпологовой популяции ели и ее выход в 1-й ярус в южной тайге начинаются в березняках, находящихся в стадии старения, возрастом около 90 лет. Сделан вывод об отсутствии принципиальных различий как строения парцеллярной структуры насаждений, так и ее дробности. В березняках с подпологовой елью при возрасте березы до 60–80 лет наблюдается нарастание монопарцеллярности фитоценозов, представленность парцелл с сомкнутым 2-м ярусом ели увеличивается, снижается число и возрастает площадь парцеллярных участков. В березняках старше 90 лет начинается разрушение монопарцеллярности строения фитоценоза, происходит увеличение числа парцелл из-за появления окон в пологе, на участках группового вывала берез или снеголома и ветровала возобновляется ель.

© Дерюгин А.А., Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б., 2023

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

Ключевые слова: южная тайга, хвойно-широколиственные леса, березняки, подпологовая ель, структура древостоя, возрастная структура древостоя, вертикальная структура древостоя, парцеллярная структура

Для цитирования: Дерюгин А.А., Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б. Динамика структуры популяции ели под пологом березняков южной тайги и смешанных лесов в европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 15–25. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-15-25>

Original article

Dynamics of the Spruce Population Structure Under the Canopy of Birch in Coniferous-Deciduous and Southern Taiga Forests of European Russia

Anatoliy A. Deryugin[✉], Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAJ-7600-2021](https://orcid.org/0000-0002-2897-5841), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2897-5841>

Natalia A. Rybakova, Candidate of Agriculture, Senior Researcher Scientist;

ResearcherID: [AAI-8908-2021](https://orcid.org/0000-0002-4978-9001), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4978-9001>

Yuri B. Glazunov, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [J-1298-2016](https://orcid.org/0000-0001-9427-9740),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9427-9740>

Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, pos. Uspenskoye, Moscow region, 143030, Russian Federation; da45@mail.ru[✉], 1986620@gmail.com, yu.b.glazunov@mail.ru

Received on March 26, 2021 / Approved after reviewing on June 22, 2021 / Accepted on June 24, 2021

Abstract. A comparative study of a restoration process is conducted in combinational forests of birch and spruce, as a population under the canopy, in the conditions of coniferous-deciduous or subboreal (Moscow region, Mozhayskiy district), and southern taiga or boreal forests (Yaroslavl region, Rybinskiy district) of European Russia. The relevance of investigations in this field is determined by the controversies over the outcomes from the natural course of successional processes in small-leaved forests with spruce growth under the canopy. The permanent trial plots, which were used for examinations, are characterized by the high-density birch forests of the oxalis-blueberry group with a first-class growth quality at the maturity stage, between 60 and 80 years old. The dynamics of age and vertical layers are investigated for the spruce under the canopy and the parcel structure of stand with ages within the 20-year period. It is determined that the main part of the spruce population under the canopy is represented by the generation, which was established in the birch forests until they reach the age of 30. The age composition of the spruce population, the arrangement of renewal periods, and the process of tree falling at the beginning and the end of the birch forests maturity stage are practically similar. In the zone of subboreal forests the vertical structure of the second layer of the spruce population develops earlier, compared to the boreal forests. In the boreal area, the formation of the under canopy second layer of spruce and its development to the first one begins at the aging stage, which is reached by birch trees around 90 years old. It was concluded that there are no fundamental differences in parcel structure of the stand or its fragmentation. In the mixed birch forests under the age of 60–80 years old the following properties are observed: an increase in the monoparcularity of phytocenoses, in the areas with a closed second layer of spruce rises the occurrence of parcels, the amount of parcel plots declines, while their areas expand. If the birch forests are older than 90 years, monoparcularity of the phytocenosis structure destroys, the number of parcels increases due



This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

to the appearance of gaps in the canopy, spruce renews in the areas the birche group-fall or after the snowfall and gusts of strong wind.

Keywords: subboreal forests, boreal forests, birch forests, population of spruce under the canopy, structure of forest stand, age composition of forest stand, vertical structure of forest stand, parcel structure

For citation: Deryugin A.A., Rybakova N.A., Glazunov Y.B. Dynamics of the Spruce Population Structure Under the Canopy of Birch in Coniferous-Deciduous and Southern Taiga Forests of European Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 15–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-15-25>

Введение

Мелколиственные насаждения, в том числе березняки, являются наиболее распространенными формациями в хвойно-широколиственном и южно-таежном лесных районах европейской части России. Это преимущественно производные насаждения, возникающие после рубки коренных хвойных древостоев. На значительной части площади таких насаждений распространены приспевающие древостои с подпологовой популяцией ели. При естественном развитии здесь протекают сукцессионные процессы, которые в определенных условиях могут привести к восстановлению коренных еловых древостоев. Исследованию этих процессов посвящено немало публикаций отечественных [2, 7, 9–13, 15] и зарубежных [18, 20–23] авторов. Однако сопоставлению строения подпологовых популяций в различных зонах не уделялось должного внимания. Хотя есть работа, посвященная сравнению строения популяции ели под пологом березняков в стадии старения для условий южной тайги и смешанных лесов [5].

Актуальность исследования обусловлена тем, что на сегодняшний день нет единого мнения о результатах естественного хода сукцессионных процессов в мелколиственных насаждениях с подпологовой популяцией ели. Остается открытым вопрос: какие насаждения сформируются после распада березняков?

Цель работы – провести сравнительный анализ возрастного, вертикального и парцеллярного строения подпологовых популяций ели в производных березняках в стадии зрелости в южно-таежном и хвойно-широколиственном лесных районах европейской части России.

Объекты и методы исследования

Исследование выполнено Институтом лесоведения РАН в южно-таежном (Ярославская область, Рыбинский район, объект Косково) и в хвойно-широколиственном (Московская область, Можайский район, объект Столбино) лесных районах. Объект исследований – подпологовая популяция ели в производных спелых березняках, находящихся в конце стадии зрелости. Работы проводили на постоянных пробных площадях (ППП), заложенных в 2000–2002 гг. в высокополнотных кислично-черничных березняках Ia класса бонитета возрастом 61 (Столбино) и 64 (Косково) года.

Объекты отличаются по составу 1-го яруса. На объекте Столбино в этом ярусе представлена только береза, на объекте Косково – присутствует осина. Тем не менее это не исключает возможность сравнения данных объектов, так как по ценоотическому воздействию на подпологовую популяцию ели осина практически не отличается от березы. По другим таксационным характеристикам объекты различаются мало (табл. 1).

Таблица 1

Таксационная характеристика 1-го и 2-го ярусов древостоев в год закладки ППП
Inventory characteristics of the first and second layers of stand in the year
of establishment of permanent trial plots

Ярус	Состав	N, тыс. экз./га	Средние			G, м ² /га	Относитель- ная полнота	M, м ³ /га
			A, лет	H, м	D _{1,3} , см			
<i>Столбино</i>								
1-й	100Б	0,40	61	27,8	26,0	21,23	0,67	254
2-й	87Е	1,08	37	9,7	9,7	7,98	0,31	41
	13Б	0,15	61	15,8	8,5	0,86	0,03	6
<i>Итого</i>	–	–	–	–	–	30,07	1,01	322
<i>Косково</i>								
1-й	61Б	0,39	64	26,5	22,9	16,17	0,54	191
	39Ос	0,12	64	29,0	31,8	9,50	0,24	122
2-й	80Е	0,72	47	10,2	10,3	6,01	0,25	35
	20Б	0,13	41	14,8	11,3	1,31	0,06	9
<i>Итого</i>	–	–	–	–	–	32,99	1,09	357

Примечание: N – число деревьев; A – возраст; H – высота; D_{1,3} – диаметр на высоте груди; G – сумма поперечных сечений стволов на высоте 1,3 м; M – запас стволовой древесины.

На ППП в год закладки (учеты 1) и затем через 17 и 19 лет соответственно для Столбино и Косково (учеты 2) были проведены учеты, в ходе которых измеряли основные биометрические характеристики деревьев (диаметр ствола на высоте 0,1 и 1,3 м, высоту дерева, радиус горизонтальной проекции кроны), посредством подсчета мутовок или годичных колец на кернах определяли возраст. Для анализа горизонтальной структуры древостоя по каждому учету были составлены планы расположения деревьев с горизонтальной проекцией их крон. Эти материалы использовали при изучении парцеллярной структуры насаждений на ППП. Выделение парцелл проводили по методике, разработанной М.В. Рубцовым и Н.А. Рыбаковой [14], с учетом теоретических положений о парцеллярной структуре фитоценозов [6, 17, 19, 24]. Парцеллы обособлены друг от друга в пространстве на всю вертикальную толщу биогеоценоза, их выделяют по структурным особенностям всех ярусов фитоценоза – древесного, кустарникового и травяно-кустарничкового. Более подробно методическая часть исследований описана в ранее опубликованной работе [12].

Результаты исследования и их обсуждение

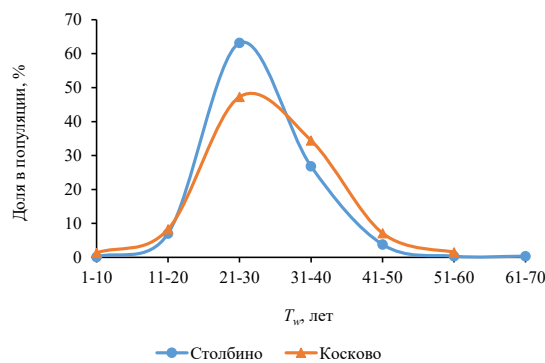
Возобновление ели под пологом мелколиственных древостоев чаще всего охватывает продолжительный период. По данным различных авторов, его длительность может ограничиваться одним классом возраста или достигать 30 и более лет [1, 3, 4, 16].

Исследования в зоне южной тайги показали, что возобновление ели под пологом березняков может проходить в ранние и поздние сроки. В первом случае популяция ели формируется за счет особей, появившихся в березняках до достижения ими 30-летнего возраста. Во втором возобновление наблюдается,

когда в популяции доминируют особи, начавшие расти в березняках возрастом более 40 лет. Это объясняется длительным отсутствием генеративных (семеносящих) деревьев на прилегающей территории.

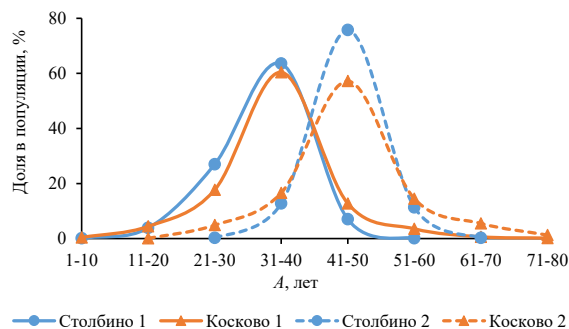
Процесс возобновления подпологовой еловой популяции характеризуется периодом возобновления (T_w) ели, сохранившейся под пологом березняков. Величина этого периода определяется разницей между средним возрастом березняка и возрастом ели. Рассматриваемые объекты относятся к популяциям с ранним возобновлением. По распределению деревьев ели по периоду возобновления они отличаются несущественно (рис. 1). Средние значения T_w равны для Столбино – 28, для Косково – 30 лет. Преобладают особи, возобновившиеся под пологом березняков до достижения ими 30-летнего возраста.

Рис. 1. Распределение деревьев ели по периодам возобновления
Fig. 1. Distribution of spruce trees by renewal periods



Период возобновления определяет возрастную структуру подпологовой популяции ели. Она, как и структура по периоду возобновления, на объектах исследований в год закладки ППП и в последующий учет практически однотипна. Об этом свидетельствуют графики возрастного распределения (рис. 2) и результаты статистической обработки данных (табл. 2). Значения среднего возраста, медианы и моды распределений в годы учетов различаются не более чем на 4 года.

Рис. 2. Возрастные распределения деревьев ели в год закладки ППП (1) и через 17 и 19 лет (2)
Fig. 2. Age distribution of spruce trees in the establishment year of the permanent trial areas (1) and 17, 19 years after (2)



Для рассматриваемых объектов характерно снижение вариации возраста, что, по-видимому, связано с процессами отпада в популяциях ели. Коэффициенты вариации возраста ели (менее 33 %) свидетельствуют о достаточной однообразности анализируемых возрастных рядов. Оценка стандартного отклонения по методу В.Ф. Лебкова [8] позволяет отнести подпологовые популяции ели на этих объектах к разновозрастным древостоям: стандартные отклонения менее 12 (табл. 2). Таким образом, по возрастной структуре, а также по течению процесса возобновления рассматриваемые популяции можно считать практически идентичными.

Таблица 2

Статистики возрастного распределения деревьев ели
Statistics of age distribution for spruce trees

Статистика	Столбино 1	Косково 1	Столбино 2	Косково 2
Число измерений, шт.	1149	1719	424	468
Средний возраст, лет	33	35	53	56
Ошибка средней, лет	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$
Стандартное отклонение, лет	5,8	8,1	4,6	9,9
Медиана, лет	34	36	53	55
Мода, лет	34	38	51	55
Коэффициент вариации, %	18	23	9	18

Анализ вертикальной структуры рассматриваемых популяций ели показал следующее. Высотные распределения деревьев ели в год закладки ППП на объектах схожи (рис. 3). Отличия состоят в том, что на объекте Столбино по сравнению с объектом Косково существенно меньше доля деревьев подроста (высота менее 6,1 м) – почти на 24 % и больше доля деревьев 2-го яруса (высота более 6,0 м) – почти на 26 %. В целом численность 2-го яруса ели составляет 1,08 и 0,72 тыс. шт./га для Столбино и Косково соответственно (см. табл. 1). Выход деревьев ели в 1-й ярус в исследованных древостоях не наблюдается.

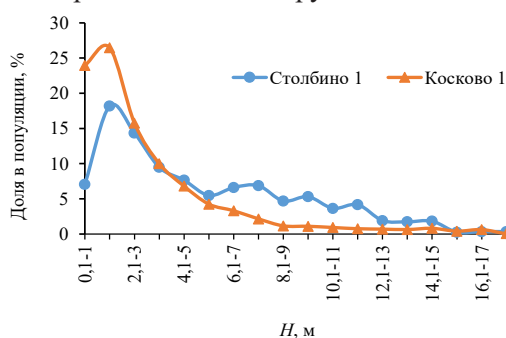


Рис. 3. Распределение деревьев ели подпологовой популяции по высотным группам в год закладки ППП
 Fig. 3. Distribution in groups by height of spruce population under the canopy in the year of establishment of the permanent trial plots

К концу возрастной стадии зрелости (учеты 2) характер распределения деревьев ели в березняке на объекте Косково мало изменился (рис. 4). Осталось преобладание (64 %) деревьев подроста высотой до 6,0 м, но доля деревьев 2-го яруса увеличилась с 11 до 36 %. Перехода деревьев ели в 1-й ярус древостоя за 19-летний период не произошло.

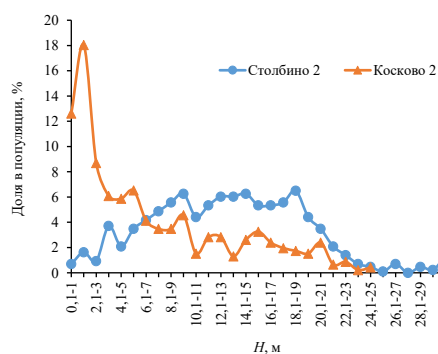


Рис. 4. Распределение деревьев ели подпологовой популяции по высотным группам через 17 и 19 лет
 Fig. 4. Distribution in groups by height of spruce population under the canopy after 17 and 19 years of growth

В отличие от объекта Косково вертикальная структура популяции ели на объекте Столбино за 17-летний период существенно изменилась. Значительно сократилась представленность деревьев подроста – с 62 до 17 %, увеличилась доля деревьев во 2-м ярусе – с 38 до 79 %. В этой популяции наблюдался выход небольшого числа деревьев ели (42 шт./га, или около 4 % численности) 2-го яруса в 1-й – деревья высотой более 24 м (рис. 4).

Такое несоответствие динамики вертикальной структуры на рассматриваемых объектах объясняется различиями в их местоположении. При одинаковых лесорастительных условиях объект Столбино, располагаясь южнее, характеризуется лучшими для роста ели климатическими условиями. Формирование 2-го яруса ели и ее выход в 1-й ярус здесь начинаются раньше, чем в подпологовой популяции ели южной тайги, где выход деревьев в 1-й ярус наблюдается в березняках, находящихся в стадии старения, в возрасте около 90 лет [12].

На изучаемых объектах за время между учетами в березняках в стадии зрелости отпад деревьев ели происходил в соответствии с их возрастным распределением. Основная часть отпада на объектах относилась к самой представительной возрастной группе 31–40 лет (табл. 3).

Таблица 3

Распределение (%) растущих и погибших деревьев ели по возрастным группам (лет)
Division (%) of growing and dead spruce trees by age groups (years)

Деревья	1–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70	71–80
<i>Столбино</i>								
Растущие	0,1	3,8	27,0	63,2	5,8	0,1	–	–
Погибшие	0,1	5,6	35,0	56,8	2,5	–	–	–
<i>Косково</i>								
Растущие	0,4	4,4	17,7	60,5	12,7	3,5	0,6	0,2
Погибшие	0,5	3,9	17,6	66,7	9,7	1,5	0,2	–

Наибольшая доля отпада наблюдается в молодых возрастных группах. На объекте Столбино существенный отпад (более 50 % деревьев в группе) характерен для первых 4 возрастных групп. На объекте Косково относительно высокий отпад – для группы 41–50 лет (табл. 4).

Таблица 4

Доля (%) погибших деревьев ели в возрастных группах (лет)
Percentage (%) of dead spruce trees in age groups (years)

Объект	1–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70	71–80
Столбино	100,0	93,2	81,9	56,4	28,1	–	–	–
Косково	85,7	61,8	70,4	78,0	53,9	29,5	18,2	0

Распределение погибших деревьев ели по высотным группам повторяет высотное распределение растущих деревьев в год закладки ППП (рис. 3, 5). Кривые распределения погибших деревьев на 2 объектах практически идентичны.

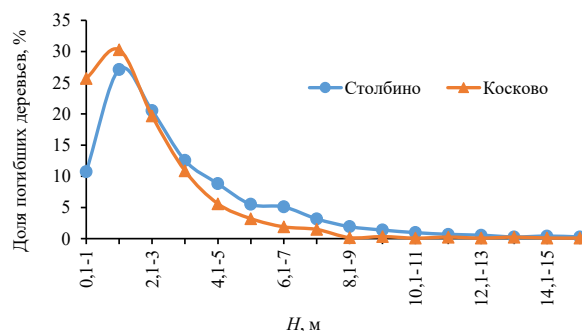


Рис. 5. Распределение погибших деревьев по группам высот

Fig. 5. Distribution of dead trees by height groups

Отпад деревьев ели в березняках, находящихся в стадии зрелости, происходит во всех группах высот. Наиболее интенсивно он протекает в подросте – деревья высотой до 6,0 м (табл. 5). По мере увеличения высоты наблюдается тенденция к уменьшению доли погибших деревьев.

Таблица 5

Доля (%) погибших деревьев ели в группах высот (м)
Percentage (%) of dead spruce trees in the height groups (m)

Объект	0,1–2	2,1–4	4,1–6	6,1–8	8,1–10	10,1–12	12,1–14	14,1–16	16,1–18	18,1–20
Столбино	94,8	87,6	68,9	38,7	20,9	13,3	14,3	20,8	–	–
Косково	78,4	83,7	56,3	43,6	15,4	13,8	17,4	9,5	–	–

Анализ свидетельствует об однотипности процессов отпада, происходящих в подпологовых популяциях ели в березняках зон южной тайги и хвойно-широколиственных лесов.

Процессы формирования насаждений на рассматриваемых объектах характеризуются сопоставимой динамикой парцеллярной структуры фитоценозов (табл. 6).

Таблица 6

Сравнительная характеристика парцеллярной структуры фитоценозов на объектах Столбино и Косково
Comparative characteristics of the parcel structure of phytocenoses at the Stolbino and Koskovo trials

Показатель	Год закладки ПП		Через 17–19 лет	
	Столбино	Косково	Столбино	Косково
Число парцелл, шт.	5	4	2	2
Число участков парцелл, шт./га	24,9	26,1	7,5	11,2
Средняя площадь парцеллы, м ²	223	382	1336	891
Парцеллы со 2-м ярусом ели, % площади ППП	89	92	89	100

На объекте Столбино выделено 5 парцелл, различающихся строением всех ярусов фитоценоза, на объекте Косково – 4 парцеллы. Число отдельных участков парцелл на ППП очень близко и составляет 24,9 и 26,1 шт./га на объектах Столбино и Косково соответственно. В год закладки ППП на обоих объектах доминировали березовые парцеллы со 2-м ярусом ели, занимавшие на объекте Столбино 89 %, на объекте Косково – 92 % площади. На объекте Стол-

бино данные парцеллы были представлены 10 парцеллярными участками с различиями в доминирующих видах травяно-кустарничкового яруса, со средней площадью участков 360 м², на объекте Косково – 6 участками средней площадью 494 м². На объекте Косково небольшими участками сохранялись парцеллы с сомкнутым еловым подростом (8 %), имевшие небольшую площадь (в среднем 107 м²). В березняках с подпологовой елью при возрасте березы до 70 лет представленность парцелл с сомкнутым 2-м ярусом ели постепенно увеличивается, снижается число и возрастает площадь парцеллярных участков.

В период между учетами на ППП наблюдалось нарастание монопарцеллярности фитоценозов. В березняках в конце стадии зрелости представленность парцелл с сомкнутым 2-м ярусом ели постепенно увеличивается, снижается число и возрастает площадь парцеллярных участков. На объекте Косково парцеллы с сомкнутым подростом ели трансформировались в парцеллу со 2-м ярусом ели. В результате еловая популяция на 89–100 % территории ППП представлена парцеллами группы «березовая со 2-м ярусом ели». Среднее число участков парцелл на ППП уменьшилось на объекте Столбино до 7,5 шт./га, на объекте Косково – до 11,2 шт./га. Средняя площадь парцелл увеличилась в несколько раз. В березняках старше 90 лет начинаются разрушение монопарцеллярности строения насаждения, увеличение числа парцелл из-за появления окон в пологе и возобновления ели на участках группового вывала берез или снеголома и ветровала [14].

Выводы

1. Формирование популяции ели под пологом березняков, находящихся в стадии зрелости, в южной тайге и в зоне хвойно-широколиственных лесов происходит по одинаковым сценариям.

2. При раннем возобновлении основу формирующихся подпологовых популяций ели в рассмотренных лесных районах составляет поколение, появившееся в березняках до достижения ими 30-летнего возраста.

3. Возрастная и парцеллярная структуры популяции ели, процессы отпада деревьев в районах исследований не имеют существенных различий.

4. В зоне хвойно-широколиственных лесов вертикальная структура популяции ели характеризуется относительно более ранним по сравнению с популяцией в южной тайге началом формирования 2-го яруса ели. Здесь отдельные деревья ели раньше выходят в 1-й ярус древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белов С.В. Лесоводство. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 352 с.
Belov S.V. *Forestry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 352 p. (In Russ.).
2. Беляева Н.В. Оценка жизненного состояния популяций подроста ели на парцеллярном уровне // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2013. № 35. С. 38–41.
Belyaeva N.V. Assessment of the State of Life of the Spruce Populations Undergrowth on the Cropping Level. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2013, no. 35, pp. 38–41. (In Russ.).
3. Дебков Н.М. Количественные и качественные параметры возобновления под пологом древостоев, сформировавшихся из предварительных генераций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 1. С. 35–44.

Debkov N.M. Quantitative and Qualitative Parameters of Renewal Under the Canopy of Forest Stand, Formed from Preliminary Generations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2015, no. 1, pp. 35–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.1.35>

4. Демаков Ю.П. Диагностика устойчивости лесных экосистем: методологические и методические аспекты: науч. изд. Йошкар-Ола: Периодика Марий Эл, 2000. 416 с.

Demakov Yu.P. *Diagnosis of Sustainability of Forest Ecosystems: Methodological and Methodical Aspects*. Yoshkar-Ola, Periodika Mariy El Publ., 2000. 416 p. (In Russ.).

5. Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б. Сравнительный анализ структуры подполюговых популяций ели в березняках южной тайги и смешанных лесов Русской равнины // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2019. № 2. С. 15–24.

Deryugin A.A., Glazunov Yu.B. Comparative Analysis of the Under-Canopy Spruce Populations Structure in Birch Forests in Southern Taiga Subzone and Mixed Forests Zone of the Russian Plain. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2019, no. 2, pp. 15–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.02>

6. Дылис Н.В. Структура лесного биогеоценоза. М.: Наука, 1969. 55 с. (Комаровские чтения, XXI).

Dylis N.V. The Structure of Forest Biogeocenosis. *Proceedings of 21st V.L. Komarov Memorial Lectures*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 55 p. (In Russ.).

7. Зарубина Л.В. Состояние естественного возобновления ели в мелколиственных лесах на севере России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 52–65.

Zarubina L.V. Natural Regeneration of Spruce in the Small-Leaved Forests in the North of Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2016, no. 3, pp. 52–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.52>

8. Лебков В.Ф. Дендрометрические основы структурно-динамической организации древесных ценозов сосны: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1992. 43 с.

Lebkov V.F. *Dendrometric Bases of Structural-Dynamic Organization of Pine Tree Coenosis*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1992. 43 p. (In Russ.).

9. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть. 1980. 408 с.

Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 408 p.

10. Орлов А.Я. Почвенно-экологические основы лесоводства в южной тайге. М.: Наука, 1991. 104 с.

Orlov A.Ya. *Soil-Ecological Bases of Forestry in the Southern Taiga*. Moscow, Nauka Publ., 1991. 104 p. (In Russ.).

11. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Возрастная динамика морфоструктуры и рост популяции ели под пологом березняков южной тайги // Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении / отв. ред. С.Э. Вомперский. М.: Наука, 2006. С. 63–81.

Ideas of Biogeocenology in Forestry and Afforestation. *Proceedings of the Institute of Forest Science of Russian Academy of Science dedicated to the 125th anniversary of Acad. V.N. Sukachev*. Ed. by S.E. Vomperskiy. Moscow, Nauka Publ., 2006, pp. 63–81. (In Russ.).

12. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Восстановительно-возрастная динамика популяции ели под пологом южно-таежных березняков при демутиационном процессе // Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент (Памяти А.И. Уткина) / отв. ред. М.Г. Романовский. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2009. С. 206–228.

Production Process and Structure of Forest Biogeocoenosis: Theory and Experiment. *Proceedings of the Institute of Forest Science of Russian Academy of Science dedicated to the 80th anniversary of Prof. A.I. Utkin*. Ed. by M.G. Romanovskiy. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2009. pp. 206–228 (In Russ.).

13. Рубцов М.В., Дерюгин А.А., Никитин А.П. Возрастная структура популяции ели под пологом березняков южной тайги // Лесоведение. 2000. № 4. С. 28–34.

Rubtsov M.V., Deryugin A.A., Nikitin A.P. Age Structure of the Spruce Population Under the Canopy of Birch Forests of the Southern Taiga. *Lesovedenie* = Forest Science, 2000, no. 4, pp. 28–34. (In Russ.).

14. Рубцов М.В., Рыбакова Н.А. Динамика парцеллярной структуры лесных фитоценозов в процессе восстановления популяции ели в южнотаежных березняках // Лесоведение. 2016. № 5. С. 323–331.

Rubtsov M.V., Rybakova N.A. Dynamics of the Partial Structure of Forest Phyto-cenoses in the Process of Restoring the Spruce Population in Southern Taiga Birch Forests. *Lesovedenie* = Forest Science, 2016, no. 5, pp. 323–331. (In Russ.).

15. Теринов Н.Н., Андреева Е.М., Залесов С.В., Луганский Н.А., Магасумова А.Г. Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 9–23.

Terinov N.N., Andreyeva E.M., Zalesov S.V., Luganskiy N.A., Magasumova A.G. Restoration of Spruce Forests: Theory, National Practice and Problem Solving. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 9–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-9-23>

16. Чупров Н.П. Зональные особенности возрастной структуры березово-еловых древостоев Европейского Севера // Лесоведение. 1988. № 3. С. 11–20.

Chuprov N.P. Zonal Specifics of Age Structure of Birch-Spruce Stands in Northern Europe. *Lesovedenie* = Forest Science, 1988, no. 3, pp. 11–20. (In Russ.).

17. Широков А.И. Использование метода парцеллярного анализа для оценки структурного разнообразия лесных сообществ // Лесоведение. 2005. № 1. С. 19–27.

Shirokov A.I. Application of the Method of Parcel Analysis by Evaluating Structural Diversity in Forest Communities. *Lesovedenie* = Forest Science, 2005, no. 1, pp. 19–27. (In Russ.).

18. Drobyshev I.V. Regeneration of Norway Spruce in Canopy Gaps in Sphagnum-Myrtillus Old-Growth Forests. *Forest Ecology and Management*, 1999, vol. 115, no. 1, pp. 71–83. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00437-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00437-X)

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

20. Metslaid M., Jõgiste K., Nikinmaa E., Moser W.K., Porcar-Castell A. Tree Variables Related to Growth Response and Acclimation of Advance Regeneration of Norway Spruce and Other Coniferous Species after Release. *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 250, no. 1-2, pp. 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.009>

21. Oliver C.D., Larson B.C. *Forest Stand Dynamics*. New York, McGraw-Hill Publ., 1990. 467 p.

22. Pretzsch H., Forrester D.I., Bauhus J. *Mixed-Species Forests: Ecology and Management*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2017. 653 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9>

23. Pukkala T., Lähde E., Laiho O. Species Interactions in the Dynamics of Even- and Uneven-Aged Boreal Forests. *Journal of Sustainable Forestry*, 2013, vol. 32, no. 4, pp. 371–403. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.770766>

24. The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems. Ed. by H. Remmert. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 1991. 168 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Original article

УДК 630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-26-37

Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga

Pavel A. Feklistov¹ ✉, *Doctor of Agriculture, Prof.*; Researcher ID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Aleksandr N. Sobolev², *Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist*;
Researcher ID [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

Nikolay A. Babich³, *Doctor of Agriculture, Prof.*; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

Natalia R. Sungurova³, *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.*; Researcher ID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Vladimir I. Melekhov³, *Doctor of Engineering, Prof.*; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

Ivan N. Bolotov¹, *Doctor of Biology, Director*; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru ✉, dimauka@fciactic.ru

²Solovetsky State Historical, Architectural and Natural Museum-Reserve, pos. Solovetsky, Primorskiy District, Arkhangelsk Region, 164070, Russian Federation; alex-sobol@mail.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.babich@narfu.ru, n.sungurova@narfu.ru, forest@narfu.ru

Received on March 25, 2021 / Approved after reviewing on June 23, 2021 / Accepted on June 26, 2021

Abstract. The studies are carried out in pine stands situated on the forest boundaries, which are in between the open space locations and forest growth areas. The investigations were made on the territory of the Kholmogorskiy and Primorskiy districts in the Arkhangelsk region. The purpose of the research is to identify the characteristics of meteorological factors at different distances from the edge of phytocenosis as well as their influence on the undergrowth and ground vegetation in the ecotone zone. For this purpose, the vegetation, which grew on the transects at different distances from the edge of the phytocenosis, is described in layers. The transects were positioned perpendicular to the forest boundary. The following parameters were described and measured, such as undergrowth, ground vegetation, luminance, air temperature, wind speed, air humidity. The taxation of the stand was accomplished by using relascope circular platforms. It is found that luminance, air temperature, and wind speed naturally decrease with distance from the edge of the phytocenosis deeper into the forest. The decrease in luminance can be revealed to 8 m, temperature to 8–15 m, wind speed to 30 m. However, air humidity increases up to 8 m. A correlation between meteorological factors and the distance from the edge of the phytocenosis is determined. The distribution of the undergrowth according to the edges of phytocenosis has a consistent pattern. The undergrowth of heliophytes of pine, birch, and aspen is most abundant at the edge of phytocenoses, and their numbers decrease with distance from the edge. The undergrowth of sciophytes either increases or its quantity does not change. Such distributions are confirmed by correlation analysis. The resulting figures are rated as significant or high. They are reliable at the significance level



of 0.05. The number of plants in the grass-shrub tier decreases with the distance deep into the forest. Any definite conclusion can't be made regarding the moss-lichen tier. In general, it can be concluded that the size of the ecotone zone in terms of meteorological factors and indicators of vegetation is 12–14 m.

Keywords: pine forests, northern taiga, edge of phytocenosis, edge effect, ecotone zone, meteorological factors, undergrowth of coniferous species, undergrowth of deciduous species, ground vegetation

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Project No. 0409-2019-0039; No. GR AAAA-A18-118011690221-0).

For citation: Feklistov P.A., Sobolev A.N., Babich N.A., Sungurova N.R., Melekhov V.I., Bolotov I.N. Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 26–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-26-37>

Научная статья

Краевой эффект сосновых древостоев северной тайги

П.А. Феклистов^{1✉}, д-р с.-х. наук, проф.; *Researcher ID:* [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

А.Н. Соболев², канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; *Researcher ID* [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

Н.А. Бабич³, д-р с.-х. наук, проф.; *Researcher ID:* [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519).

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

Н.Р. Сунгурова³, д-р с.-х. наук, доц.; *Researcher ID:* [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596).

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

В.И. Мелехов³, д-р техн. наук, проф.; *Researcher ID:* [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

И.Н. Болотов¹, д-р биол. наук, директор; *Researcher ID:* [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 109, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru[✉], dima_nauka@fciactic.ru


²Соловецкий музей-заповедник, пос. Соловецкий, Приморский р-н, Архангельская обл., Россия, 164070; alex-sobol@mail.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.babich@narfu.ru, n.sungurova@narfu.ru, forest@narfu.ru

Поступила в редакцию 25.03.21 / Одобрена после рецензирования 23.06.21 / Принята к печати 26.06.21

Аннотация. Исследование выполнено в сосновых древостоях, расположенных на границах «лес – открытое пространство» на территории Холмогорского и Приморского районов Архангельской области. Цель – выявление особенностей метеорологических факторов на разных расстояниях от края фитоценоза, а также их влияния на подрост и напочвенный покров в экотонной зоне. На трансектах, заложенных перпендикулярно границе леса, на разном расстоянии от края фитоценоза (полосами) производилось

© Феклистов П.А., Соболев А.Н., Бабич Н.А., Сунгурова Н.Р., Мелехов В.И., Болотов И.Н., 2023

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

описание подроста, растений живого напочвенного покрова, выполнялась таксация древостоя с использованием реласкопических круговых площадок, измерялись освещенность, температура и влажность воздуха, скорость ветра. Установлено, что освещенность, температура воздуха и скорость ветра закономерно уменьшаются по мере удаления от края фитоценоза в глубь леса. Снижение освещенности проявляется до 8 м, температуры – до 8–15 м, скорости ветра – до 30 м. Влажность воздуха, наоборот, возрастает на расстоянии до 8 м. Обнаружена тесная корреляционная связь метеофакторов с удаленностью от края фитоценоза. Размещение подроста по площади имеет закономерный характер. Подрост светолюбивых видов – сосны, березы, осины – наиболее представлен на краях фитоценозов, по мере удаления от них его количество уменьшается. Подрост теневыносливой ели на расстоянии от опушки, напротив, или начинает встречаться чаще, или его число не меняется. Такое размещение по площади подтверждается корреляционным анализом. Полученные показатели связи значительные или высокие, достоверные при уровне значимости 0,05. Представленность видов растений травяно-кустарничкового яруса также уменьшается по мере удаления в глубь лесных массивов. В отношении мохово-лишайникового яруса однозначного заключения сделать нельзя. В целом можно констатировать, что размер экотонной зоны по метеофакторам и индикаторам растительности составляет 12–14 м.

Ключевые слова: сосняки, северная тайга, край фитоценоза, краевой эффект, экотонная зона, метеорологические факторы, подрост хвойных пород, подрост лиственных пород, живой напочвенный покров

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

Для цитирования: Feklistov P.A., Sobolev A.N., Babich N.A., Sungurova N.R., Melekhov V.I., Bolotov I.N. Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 26–37. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-26-37>

Introduction

A fragmentation of forest area into separate structures is the division of a single forest massif into separate fragments by roads, sifting, meadows, fields, gas pipelines, etc. This process cannot be stopped. It may only increase. As a result, separate fragments are formed that are in contact with free space. An edge effect is observed at the boundaries [16]. The edge locations are characterized by fluctuations in luminance levels, temperature, humidity, and wind speed [8, 21]. The phenomenon of fragmentation is observed in the literature [18], where the disappearance of unified forest areas in England is described, as well as an invasion of invertebrate species about 250 m inside the tropical forests deep. In general, this process is considered as negative. There is no information in the literature on the natural regeneration of forest-forming tree species in the boarding ecotone zone, which are edifiers and form the ecosystem. However, it is obvious that this process depends mostly on the geographical position of the area. Inside one region, it is influenced by the characteristics of the forest, such as composition of types, age of stands, density, or completeness of trees, growing environment and other factors.

The occurrence and presence of ecotones and ecotone zones are often considered rather comprehensively without the designation of boundary conditions for research, changes in environmental factors, characteristics and productivity of plant assemblages [1, 4, 10–13, 20].

In total, the process of fragmentation is extensive, but at the same time, it is insufficiently investigated. Although, it must be mentioned that the phenomenon was examined in the implementation of hydroforestry. The drainage canals were placed on the prepared glades with a fairly large width. The canals were about 1 m wide at the top. These factors created an edge effect both in growing forest stock and in emerging stands on drained swamps. However, the boundary impact was more often analyzed according to the influence of the drainage channel on the hydrological regime, root anoxia, physiological processes, wood growth, natural regeneration, etc. The main studies of such type are given in the following references: [3, 5, 17, 26]. Although, the articles that describe the drained locations are few and they are about Altai [14], the Southern Urals [25], and the Arkhangelsk region [6, 23]. Therefore, the goal of the study is to investigate the edge effect in the pine forests of the northern taiga in the Arkhangelsk region.

Research objects and methods

The research was conducted in the pine forests of the Kholmogorskiy district forestry near the village of Matigora. In the Primorskiy region, the investigation was performed in different locations of the Isakogorskiy district forestry. In the experimental areas, the transects were perpendicular to the border of the phytocenosis and with a length sufficient for studying the edge effect (150 m) and considering the known facts on the range of the edge effect [18].

On the transects, description of vegetation was made by layers (at different distances from the edge of the phytocenosis), which are undergrowth and vegetation cover. The tree stand was taxed using relascope circular platforms [2, 19]. The Field Forest Inventory Guide [7, 23] was used in the material processing. The diameters of the trees were measured at chest height with a tree caliper (accuracy ± 1 cm). The heights were measured with a VUL-1 altimeter, which gives an accuracy of ± 0.5 m. To determine the average age of the stand, core samples were taken with a Pressler borer.

All pine forests are either pure or with a prevalence of pine in the composition (table 1). The type of the forest is blueberry pine. The emerging stands are of 4–6 age classes.

To measure air temperature, air humidity, wind speed an MES-200 device was used. Besides, for a more detailed study a portable weather station WS-3600 was applied. The luminance was measured with a Yu 116 luxmeter.

Results and discussion

To study the edge effect, we analyzed the change at different distances from the edge of the phytocenosis of the most important environmental factors for plants, and then the reaction of the plants themselves. Luminance is one of the most important factors for the existence of the plants. The luminance in ecotone zones does not remain constant. In an open area, it has a maximum value and does not change before the edge of the forest. At this point, it depends on a certain time of the day, cloudiness, the nature of the clouds, and some other factors. As it penetrates the forest stand, it sharply decreases (Fig. 1). In fact, 50 m from the edge of the forest phytocenosis, it does not change. Such characteristic is typical for measurements at different times during the vegetation season. Similar results were obtained for all transects in the Kholmogory region.

Table 1

Forestry-taxation characteristics of forest stands on transects in blueberry pine forests

Direction of transects	Number	Stand composition	Tree species	Average		Relative normality	Growth class	Age class
				diameter, cm	height, m			
<i>Primorskiy district (adjacent to branch trails and roads)</i>								
East-west (94)	1	8P1As1B+S	P	18.7	18.3	0.74	IV	VI
			S	9.1	8.5	0.12	–	–
			B	12.4	16.0	0.13	–	–
			As	23.3	19.8	0.10	–	–
	2	8P1As1B+S	P	18.1	17.8	0.80	IV	VI
			S	8.9	11.0	0.06	–	–
			B	12.8	20.5	0.06	–	–
			As	26.3	23.3	0.08	–	–
	3	8P1As1B+S	P	17.1	17.4	0.80	IV	VI
			S	8.5	9.0	0.09	–	–
			B	10.1	18.3	0.08	–	–
			As	22.1	20.7	0.09	–	–
North-south (95)	4	9P1B+S, sin.As	P	17.4	18.4	0.84	IV	VI
			S	7.6	8.8	0.05	–	–
			B	11.2	12.7	0.10	–	–
			As	9.0	14.5	0.00	–	–
	5	9P+B,As, sin.S	P	16.5	18.0	0.78	IV	VI
			S	8.7	6.5	0.05	–	–
			B	13.1	16.8	0.07	–	–
			As	17.7	19.3	0.03	–	–
	6	9P+As,B,S	P	16.3	17.2	0.76	IV	VI
			S	8.6	7.7	0.05	–	–
			B	9.9	17.2	0.07	–	–
			As	19.0	16.2	0.05	–	–
North-south (91)	7	6P3B1As	P	19.2	17.8	0.71	IV	VI
			S	13.4	17.8	0.43	–	–
			B	14.0	18.5	0.16	–	–
	8	6P3B1As, sin.S	P	18.9	17.8	0.68	IV	VI
			S	7.0	8.8	0.01	–	–
			B	14.7	17.9	0.55	–	–
			As	13.7	18.3	0.07	–	–
	9	7P3B+S, sin.As	P	19.5	18.3	0.73	IV	VI
			S	23.0	20.5	0.03	–	–
			B	14.3	17.5	0.24	–	–
			As	11.0	16.0	0.02	–	–

The end of Table 1

Direction of transects	Number	Stand composition	Tree species	Average		Relative normality	Growth class	Age class	
				diameter, cm	height, m				
North-south (91)	10	9P1B	P	19.6	19.4	0.74	IV	VI	
			B	16.4	16.6	0.14	–	–	
	11	9P1B, sin.As,S	P	18.8	19.0	0.68	IV	VI	
			S	20.6	19.4	0.01	–	–	
			B	14.3	20.0	0.08	–	–	
			As	10.0	15.0	0.01	–	–	
	12	8P1B+As, sin.S	P	19.2	19.0	0.67	IV	VI	
			S	7.0	9.0	0.02	–	–	
			B	12.9	21.5	0.12	–	–	
			As	15.7	19.0	0.03	–	–	
	<i>Primorskiy district (adjacent to the field)</i>								
	Northwest-southeast	3	1P2S3B4As	P	19.0	17.4	0.50	IV	V
S				18.5	17.4	IV		V	
B				19.4	19.2	–		7	
As				21.3	22.3	–		V	
Northwest-southeast	1	1P3S3B3A	P	18.5	17.0	0.50	IV	V	
			S	18.0	17.0		IV	V	
			B	19.4	19.0		–	7	
			As	22.3	22.5		–	V	
<i>Kholmogory district (adjacent to the field)</i>									
North-south	1	8P2As+S,B	P	19.8	14.7	0.73	IV	IV	
Northeast-southwest	2	8P1B1As+S	P	17.5	13.9	0.69	IV	IV	
Northeast-southwest	3	7P1B1As1S	P	19.7	14.8	0.72	IV	IV	
North-south	4	6P2S2B+As	P	18.4	14.7	0.69	IV	IV	

Note: P – pine; As – aspen; B – birch; S – spruce; sin. – singly in the array.

The revealed pattern was also confirmed about 80 km from this location in the field-forest border in the Primorskiy region. It should be noted that the stands adjoining fields are usually mixed, with the presence of a significant number of deciduous species (table 1). The obtained results showed that the initially selected measurement interval (measurements were taken every 50 m, and they were chosen based on the literature data) is not entirely correct. Further, we took the measurements more frequently, every 10 m, and then even every 2 m. This made it possible to clarify the size of the ecotone zone. A more detailed study (Fig. 2) at another location (Primorskiy district) revealed that starting from 8 m from the edge of the stand, the luminance remains approximately at the same level. Thus, this factor forms an ecotone zone about 8 m wide from the forest edge. The degree of connection between the luminance and the distance from the edge of the phytocenosis ranges from significant to high ($r = -0.57-0.80$; $\eta = 0.61-0.85$).

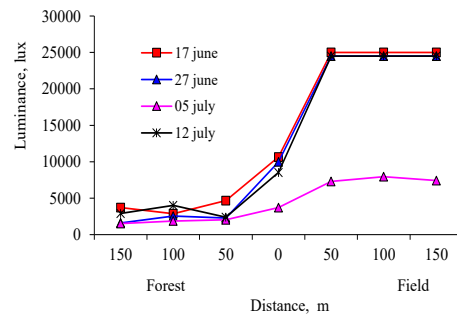


Fig. 1. Luminance change in the ecotone zone from the field and forest sides (4 transects, Khomogorsky district)

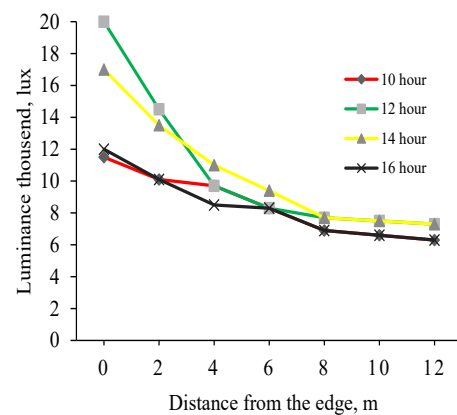


Fig. 2. Luminance in blueberry pine forests at different distances from the edge of the phytocenosis (Primorskiy district, 95)

It is interesting to trace the change in the wind speed when it enters the forest stands. In order to exclude the influence of the dates of the measurements on the obtained results, the wind speed was estimated as a percentage of its speed in an open space. It turned out that on different days of the vegetation season, the damping of the wind when entering the stand is almost the same. It is maximum at the edge and then sharply decreases at a distance of 30 m (Fig. 3).

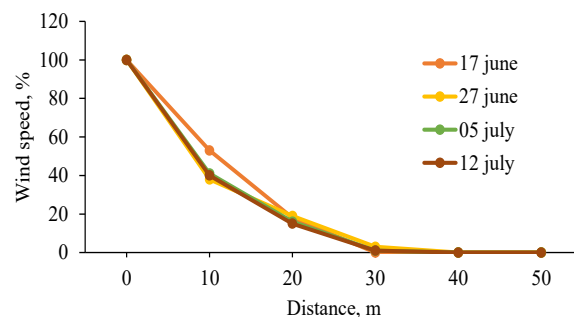


Fig. 3. Change in wind speed from the edge to the forest (Kholmogorskiy district, 4 transects)

The wind speed and the luminance on different transects have the same character. However, the air temperature and the humidity have some variety. Most often, the temperature naturally decreases with distance from the edge of the stand. The air temperature decreases gradually with distance from the edge of the phytocenosis to 8–15 m into the forest deep. The difference between the temperatures is 2–10 %. This measurement pattern can be traced both at the height of 1.3 and at 0.15 m. However, at the height of 0.15 m in daytime hours, the air temperature is always

3–6 degrees higher than at the height of 1.3 m. The correlation analysis shows that the relationship lays in the range between significant and high ($r = -0.43-0.59$; $\eta = 0.48-0.65$), with reliable indicators at the significance level of 0.05. At first glance, in some cases, insignificant differences in temperature may not affect the growth and development of the plants. However, it should be noted that, for the passage of life cycles in poikilothermic organisms, which include plants, the sum of effective temperatures is important [9]. Consequently, the daily summation of temperature that rises above the critical value can ultimately amount to a significant value during the vegetation season.

The air humidity has a general tendency to increase with distance from the edge of the phytocenosis into the forest deep. The increase occurs up to 8 m. The difference reaches 3–4 % at the height of 1.3 m and 3–6 % at the height of 0.15 m, in comparison with the edge of the stand. It should be noted that air humidity is usually higher at 1.3 m, compared to surface air at 0.15 m, and is 4–6 %. Only on some sunny days is the humidity in the surface layer higher than 1.3 m. Correlation analysis showed that the dependences in general have significant or high connections. The correlation coefficients ranged from 0.58 to 0.62, and the correlation ratios were 0.69–0.83. All indicators are reliable at a significance level of 0.05.

It is better to trace the influence of the edge effect on plant life using the example of undergrowth and ground vegetation, since they are affected by it. In the undergrowth of all types of woody plants a connection was discovered between the quantity and the location due to the edge of phytocenosis the pine undergrowth under the canopy of blueberry pine forests is not found on all trial plots. It can be that the light conditions for its settlement and growth are unfavorable. For example, A.V. Veretennikov [24] indicated that a luminance of 3000 lux, is critical for the process. In the ecotone zone, undergrowth of pine, spruce, birch and aspen was observed, so these species were investigated further. For this purpose, we divide them into the groups of heliophytes (pine, birch, aspen) and sciophytes. This division is traditional and widely included in articles on forestry and forest ecology [15, 22].

The correlation analysis of the relationship between the amount of undergrowth and the distance from the edge of the phytocenosis showed the following. The dependencies are fundamentally different for the heliophytes species and sciophytes spruce. If the relationship is positive for spruce, consequently, the further away from the edge, the more undergrowth. That for pine, birch and aspen, on the contrary, is negative, the further from the edge, the less undergrowth (table 2). The level of the correlation measured varies from significant to high or very high. Most of the correlations are non-linear. The correlation ratios are in the range from 0.79 to 0.95. The obtained correlation indicators are reliable at all levels of significance.

Near the edge of the phytocenosis, the amount of undergrowth ranges from 3000 pcs/ha for aspen to 5700 pcs/ha for birch. As the distance from the edge increases, the amount of undergrowth is almost zero for pine, birch, and aspen (Fig. 4). On some transects, as already noted, there was no pine undergrowth. Consequently, in the undergrowth of heliophyte types, the edge effect extends to 12–14 m.

Table 2

**Values of the correlation measured between the density of the undergrowth
and the distance from the edge of the phytocenosis**

Tree species	Attitude to light	Transect direction	Correlation rate, $r \pm m_r^*$	Validity, t_r	Correlating ratio, $\eta \pm m_\eta^{**}$	Validity, t_η
Spruce	Sciophytes	East-west	0.66 ± 0.224	5.47	0.95 ± 0.127	14.27
		North-south	0.92 ± 0.139	18.68	0.95 ± 0.129	22.17
Aspen	Helio-phytes	East-west	-0.84 ± 0.164	13.06	0.94 ± 0.136	14.29
		North-south	-0.84 ± 0.166	13.20	0.89 ± 0.145	17.30
Birch	Helio-phytes	East-west	-0.54 ± 0.258	3.54	0.79 ± 0.181	9.73
		North-south	-0.80 ± 0.187	10.02	0.89 ± 0.115	15.49
Pine		East-west	-0.79 ± 0.181	9.63	0.88 ± 0.148	13.81

* m_r – error correlation rate; ** m_η – error correlating ratio.

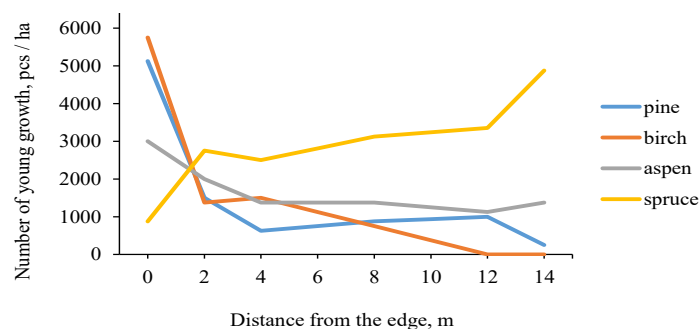


Fig. 4. The amount of undergrowth at different distances from the edge of the phytocenosis

The size of the ecotone zone can be determined not only by changes in meteorological factors, but also by changes in the amount of undergrowth of different tree species at different distances from the ecotone, using the equations obtained (table 3). The width of the ecotone zone is 8–12 m for aspen, 12–16 m for birch, and 14–16 m for pine. For spruce, the edge effect is not manifested.

The number of species of ground vegetation in the studied pine forests is small. They are distributed unevenly in the marginal zone of the phytocenosis. In the grass-shrub tier, the largest number of species is concentrated near the edge of the phytocenosis. More deeply into the forest, their number decreases to 5 and remains at this level (Fig. 5). In relation to the moss-lichen tier, such patterns are not manifested. In some cases, there are more of them at the edge; in others, they are at different distances. Thus, the edge effect affects only the plants of the grass-shrub tier and manifests itself up to 8 m.

Table 3

Dependence between the number of undergrowth (pcs/ha) to the distance from the edge of the phytocenosis (m)

Tree species	Transect direction	The equation	Ecotone zone size, m
Pine	East-west	$y = 74.67 + 3135.57/x$	14–16
Birch	East-west	$y = 411.47 + 900.75/x$	12–16
	North-south	$y = 496.04 + 10462.02/x$	12–16
Aspen	East-west	$y = 553.59 + 3660.22/x$	8–12
	North-south	$y = 553.59 + 3660.22/x$	8–12
Spruce	East-west	$y = 516.62 + 34.60x$	Does not depend on the edge of the phytocenosis
	North-south	$y = 425.77 + 227.19x$	

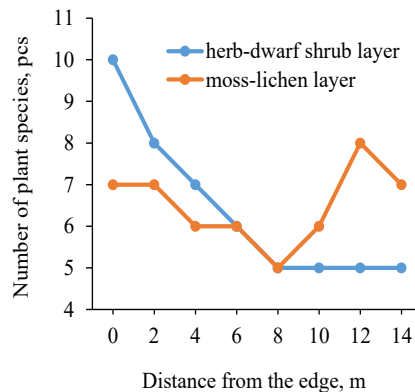


Fig. 5. The number of species of ground vegetation at different distances from the edge of the phytocenosis

Conclusions

1. The marginal effect is manifested in changes of meteorological factors and quantitative indicators of undergrowth of tree species and plants of the grass-shrub tier. Luminance varies to 8 m; temperature to 8–15 m, air humidity to 8 m, wind speed to 30 m. On average, the width of the ecotone zone according to meteorological factors is 14 m. The marginal effect on undergrowth and grass-shrub tier is manifested on average up to 12 m. There were no differences in the impact of the field-forest, road-forest ecotone species.

2. A close correlation was established between meteorological factors and the distance to the edge of the phytocenosis.

3. The placement of undergrowth over the area is associated with the edge of phytocenoses. The amount of undergrowth decreases with distance from the edge for heliophytes species of woody plants (pine, birch, aspen) and does not change or increase for sciophytes.

4. The number of species of the grass-shrub tier naturally decreases with increasing distance from the forest edge.

REFERENCES

1. Akhalkatsi M., Arabuli G., Asanidze Z., Goloshvili T., Togonidze N. Pine Forest on Tree-Line Ecotone in the Mountain Kazbegi in the Georgia (South Caucasus). *Sciences and Engineering*, Georgia, Tbilisi, 2019, no. 21(1), pp. 7–11. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2019.21.556149>
2. Anuchin N.P. *Forest Taxation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).
3. Babikov B.V. *Ecology of Pine Forests in Drained Bogs*. Sankt Peterburg, Nauka Publ., 2004. 166 p. (In Russ.).
4. Chai Z., Wang D. A Comparison of Species Composition and Community Assemblage of Secondary Forests Between the Birch and Pine-Oak Belts in the Mid-Altitude Zone of the Qinling Mountains, China. *PeerJ Preprints*, 2016, vol. 4, p. 1900. <https://doi.org/10.7717/peerj.1900>
5. Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Barzu V.M. *Biological and Ecological Characteristics of Pine Growth in the Northern Subzone of the European Taiga*. Arkhangelsk, AGTU Publ., 1997. 140 p. (In Russ.).
6. Feklistov P.A., Filippov B.Yu., Bolotov I.N., Kononov O.D., Torbik D.N. Ecotone Zones in Forest Ecosystems of the North. *Vestnik of Pomor University, Series: Natural Sciences*, 2011, no. 4, pp. 102–105. (In Russ.).
7. *Field Forest Inventory Guide*. Ed. by S.V. Tretyakov, S.V. Yaroslavtseva, S.V. Koptev, Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 252 p. (In Russ.).
8. *Forest Patches in Tropical Landscapes*. Ed. by J. Schelhas, R. Greenberg. Washington D.C., Island Press Publ., 1996. 426 p.
9. Goryshina T.K. *Plant Ecology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 368 p. (In Russ.).
10. Holtmeier F.-K., Broll G. Subalpine Forest and Treeline Ecotone Under the Influence of Disturbances: A Review. *Journal of Environmental Protection*, vol. 9, no. 7, 2018, pp. 815–845. <https://doi.org/10.4236/jep.2018.97051>
11. Kirkman L.K., Mitchell R.J., Helton R.C., Drew M.B. Productivity and Species Richness Across an Environmental Gradient in a Fire-Dependent Ecosystem. *American Journal of Botany*, 2011, vol. 88, no. 11, pp. 2119–2128. <https://doi.org/10.2307/3558437>
12. Law D.J. Forest and Range Ecotone Restoration in Central Montana. *Graduate Student Theses, Dissertations, & Professional Papers*, 2004, no. 9493. Available at: <https://scholarworks.umt.edu/etd/9493>
13. Kullman L. The Alpine Treeline Ecotone in the Southernmost Swedish Scandes: Dynamism on Different Scales. *Ecotones Between Forest and Grassland*, New York, Springer, 2012, pp. 271–298. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3797-0_12
14. Malenko A.A., Usoltsev V.A. Investigation of the Edge Effect in Nesting Pine Corps of Different Initial Density in Altayskiy Kray. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2010, no. 4(66), pp. 51–56. (In Russ.).
15. Melekhov I.S. *Forestry Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 407 p. (In Russ.).
16. Odum Yu. *Fundamentals of Ecology*. Moscow, Mir Publ., 1975. 741 p. (In Russ.).
17. Pakhuchiy V.V. *Productivity Factors of Drained Plantations in European North-East*. Syktyvkar, Komi Scientific Center of Ural Branch of RAS Publ., 1991. 100 p. (In Russ.).
18. Primak R.B. *Basics of Biodiversity Preservation*. Moscow, Izdatel'stvo NUMTs Publ., 2002. 255 p. (In Russ.).
19. *Recommendations on Allocation and Inventory of Forests Cutting Areas in the Arkhangelsk Region*. Ed. by S.V. Tretyakov, S.V. Koptev, et al. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 102 p.

20. Shorohova E., Kuuluvainen T., Kangur A., Jõgiste K. Natural Stand Structures, Disturbance Regimes and Successional Dynamics in the Eurasian Boreal Forests: A Review with Special Reference to Russian Studies. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, no. 2, p. 201. <https://doi.org/10.1051/forest/2008083>
21. Tanner E. Tropical Forest Remnants. Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities. *Journal of Tropical Ecology*, 1999, vol. 15, no. 3, p. 379.
22. Tikhonov A.S. *Forestry Science*. Kaluga, Oblizdat Publ., 2011. 332 p. (In Russ.).
23. Torbik D.N., Feklistov P.A., Mochalov B.A., Tretyakov S.V. Ecotone Effect in Forest Communities after Corridor Thinning. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2012, no. 5, pp. 46–51. (In Russ.). Available at: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/2012/%E2%84%965-2012.pdf>
24. Veretennikov A.V. *Plant Physiology with Basic Biochemistry*. Voronezh, Izdatel'stvo VGU Publ., 1987. 256 p. (In Russ.).
25. Veselkin D.V., Shavnin S.A., Vorobeychik E.L., Galako V.A., Vlasenko V.E. Edge Effects for Pine Stands in a Large City. *Ecology*, 2017, no. 6, pp. 405–412. (In Russ.).
26. Vomperskiy S.V., Sabo E.D., Formin A.S. *Forest Drainage Reclamation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 296 p. (In Russ.).

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

Научная статья
УДК 581.1:58.02
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-38-57

Сезонная динамика содержания компонентов антиокислительной системы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне локального теплового воздействия

С.А. Шавнин¹, д-р биол. наук, проф., вед. науч. сотр.; ResearcherID: [L-3389-2018](https://orcid.org/0000-0001-6908-3324),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6908-3324>

И.А. Юсупов¹, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-4578-2021](https://orcid.org/0000-0001-5782-9483),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5782-9483>

А.А. Монтиле¹✉, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [G-4617-2019](https://orcid.org/0000-0003-3983-8030),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3983-8030>

Д.Ю. Голиков¹, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [D-2177-2016](https://orcid.org/0000-0002-8871-1135),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8871-1135>

Н.В. Марина², канд. хим. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-1754-2021](https://orcid.org/0000-0002-2641-2981),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2641-2981>


¹Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; sash@botgard.uran.ru, usiaz@mail.ru, org17@mail.ru✉, mit2704@gmail.com

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; labbav@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.03.21 / Одобрена после рецензирования 21.06.21 / Принята к печати 24.06.21

Аннотация. Исследовали сезонные изменения в период низких температур и характер корреляционных связей для содержания общей воды в хвое, пероксидазной активности и содержания отдельных компонентов антиокислительной системы хвои: каротиноидов, аскорбиновой кислоты, катехинов и флавонолов – у деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в градиенте условий среды, формируемых в зоне влияния теплового поля газового факела (на разном удалении от него) на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (Россия). Проверены 3 гипотезы: 1) тепловое поле газового факела в условиях низких температур влияет на водный обмен и состояние антиокислительной системы хвои; 2) повышение температуры среды в зоне влияния факела в осенне-зимний период приводит к уменьшению количества влаги в хвое, которое вызывает состояние окислительного стресса в клетках; 3) в работе антиокислительной системы хвои между ее отдельными компонентами существуют взаимосвязи, характеристики которых трансформируются в зависимости от условий среды, определяемых удалением от газового факела. В градиенте действия теплового поля факела не наблюдается дополнительного по сравнению с фоном снижения содержания общей воды в хвое и признаков изменения состояния антиокислительной системы, характерных для окислительного стресса. Влияние газового факела на показатели физиологического состояния хвои максимально на ближней к факелу секции. Оно проявляется в виде увеличения пероксидазной активности, количества общей воды, каротиноидов и в снижении содержания флавоноидов и аскорбиновой кислоты. Сезонная динамика изученных показателей не коррелирует с температурой среды, что говорит о ее непрямом действии на регуляцию активности антиокислительной системы хвои. Факторный и корреляционный анализ данных свидетельствуют об отличии физиоло-

© Шавнин С.А., Юсупов И.А., Монтиле А.А., Голиков Д.Ю., Марина Н.В., 2023

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

гического состояния хвои на разном удалении от факела. В функционировании компонентов антиокислительной системы хвои не наблюдается доминирования отдельных процессов. Взаимосвязи между изученными показателями изменяются с удалением от факела. Наиболее устойчивой является отрицательная связь пероксидазной активности с остальными показателями, усиливающаяся с увеличением расстояния до факела. Степень согласованности работы отдельных компонентов антиокислительной системы максимальна в условиях фона и уменьшается с приближением к факелу. Это объясняется модифицирующим влиянием факела на физиолого-биохимические процессы адаптации хвои к конкретным климатическим условиям среды.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, каротиноиды, флавонолы, катехины, аскорбиновая кислота, пероксидазная активность, потепление климата, антиокислительная система

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы УрО РАН на 2018–2020 гг. (грант № 18-4-4-10) и в рамках госзадания ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН».

Благодарности: Авторы выражают благодарность ведущему инженеру УГЛТУ Г.Н. Новоселовой за непосредственное участие в постановке задач работы и проведении лабораторных анализов, а также Нижневарттовскому отделу филиала ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Уральскому федеральному округу» по ХМАО – Югре за предоставление результатов химико-аналитической работы.

Для цитирования: Шавнин С.А., Юсупов И.А., Монтиле А.А., Голиков Д.Ю., Марина Н.В. Сезонная динамика содержания компонентов антиокислительной системы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне локального теплового воздействия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 38–57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-38-57>

Original article

Seasonal Dynamics of Content of Antioxidant System Component in Needles of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Trees Situated in the Local Warming Impact Zone

Sergey A. Shavnin¹, Doctor of Biology, Prof., Leading Research Scientist;

ResearcherID: [L-3389-2018](https://orcid.org/0000-0001-6908-3324), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6908-3324>

Irek A. Yusupov¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [AAK-4578-2021](https://orcid.org/0000-0001-5782-9483),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5782-9483>

Andrey A. Montile¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [G-4617-2019](https://orcid.org/0000-0003-3983-8030),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3983-8030>

Dmitry Yu. Golikov¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [D-2177-2016](https://orcid.org/0000-0002-8871-1135),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8871-1135>

Nataliya V. Marina², Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAL-1754-2021](https://orcid.org/0000-0002-2641-2981),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2641-2981>

¹Institute Botanic Garden UBRAS, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202 a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; sash@botgard.uran.ru, usiaz@mail.ru, org17@mail.ru, mit2704@gmail.com

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; labbav@yandex.ru

Received on March 13, 2021 / Approved after reviewing on June 21, 2021 / Accepted on June 24, 2021

Abstract. The seasonal changes in a period of low temperatures and characteristic correlations of some antioxidant system (AOS) components in pine needles influenced by a gas flare are investigated in this study. The parameters taken are total water content (TWC) in needles, peroxidase activity (AP) and selected elements of the antioxidant system of needles, such as content of carotenoids (Car), ascorbic acid (AA), catechins (Cat) and flavanols (Fl). The needles come from Scots pine trees (*Pinus sylvestris* L.), which grow in a gradient of environmental conditions formed in the zone of thermal field of the gas flare impact (at various distances). The gas flare is situated on the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug (UGRA) of Russia. Three hypotheses were subject to verification: 1) the thermal field of the gas flare during the low temperature period affects the water exchange and the AOS state of needles; 2) increase in temperature of the environment in the flare impact zone during the autumn-winter period causes the decrease in amount of moisture in needles, which is a trait of oxidative stress in cells; 3) in the functioning of a needle's AOS, there are correlations between its components, which values depend on distance from the gas flare and environment created by it. It was found that in the thermal field gradient of the flare, there is neither an additional reduction in TWC in needles compared to the background nor signs of change in the state of AOS corresponding to the oxidative stress in the cells. The greatest impact of the gas flare on characteristics of the physiological state of pine needles is observed in the section closest to the flare. It reveals in the higher values of AP, TWC, Car and decrease in concentration of Fl and AA. The seasonal dynamics of the studied traits values do not correlate with the temperature of the environment. It indicates the indirect effect on the regulation of needle's AOS activity. The factor and correlation analysis of the data indicate a difference in physiological state of pine needles at different distances from the flare. There is no domination of any processes in the functioning of AOS components. The observed correlations between the studied properties change according to distance to the flare. The most stable is a negative AP relationship with other parameters, which rise with the increased distance from the flare. The consistency degree of separate AOS components functioning is maximal in background conditions and decreases when approaching the flare. This fact is explained by the modifying effect of the flare on physiological and biochemical processes of the needle's adaptation to specific climatic conditions of the environment.

Keywords: *Pinus sylvestris*, carotenoids, flavanols, catechins, ascorbic acid, peroxidase activity, climate warming, antioxidant system

Funding: This work was financially supported by the Comprehensive Program of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for 2018–2020 (Grant No. 18-4-4-10) and within the state assignment of the Federal State Budgetary Institution of Science “Institute Botanic Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”.

Acknowledgments: The authors are grateful to G.N. Novoselova, the leading engineer of the Ural State Forest Engineering University, for her direct participation in setting tasks for the research and conducting the laboratory analysis, as well as to the Nizhnevartovsk branch of the Federal State Budgetary Institution "Center for Laboratory Analysis and Technical Measurements in the Ural Federal District" of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug (UGRA) for providing the results of the chemical and analytical work.

For citation: Shavnin S.A., Yusupov I.A., Montile A.A., Golikov D.Yu., Marina N.V. Seasonal Dynamics of Content of Antioxidant System Components in Needles of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Trees Situated in the Local Warming Impact Zone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 38–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-38-57>

Введение

Антиокислительная система (АОС) является одним из важных механизмов регуляции метаболизма и адаптации растений к изменениям условий среды, включая норму реакции и ответ на стрессовые воздействия. Основная

функция АОС заключается в регуляции содержания активных форм кислорода и баланса окислительно-восстановительных реакций и процессов в различных частях клетки [3, 5, 18]. Состояние АОС определяется активностью ферментных систем (супероксиддисмутаза, пероксидазы, каталаза и др.) [5, 18, 29], а также содержанием отдельных компонентов – низкомолекулярных метаболитов (каротиноиды, аскорбиновая кислота, пролин, α -токоферол, полиамины, полифенолы и др.) [3, 5, 11, 13]. В связи с этим интерес представляет изучение процессов функционирования отдельных компонентов АОС в листьях вечнозеленых растений в течение периода низких температур среды [7, 21, 27] и установление степени согласованности и характера взаимосвязей между отдельными звеньями общей сети антиокислительных реакций в клетке.

При исследовании АОС хвойных значительное внимание уделяется окислительному стрессу, вызываемому в том числе весенней засухой. Усиление засухи приводит к уменьшению содержания низкомолекулярных антиоксидантов (аскорбиновой кислоты, флавоноидов) в хвое *Picea abies* (L.) H. Karst., значительному возрастанию активности супероксиддисмутаза и снижению активности гваяколпероксидазы [14]. Дефицит влаги в почве влияет на содержание вторичных метаболитов в хвое сосны обыкновенной [23]. Результаты изучения сезонных изменений активности гваяколпероксидазы хвой сосны обыкновенной, полученные в условиях континентального климата, указывают на сохранение активности АОС в периоды низких температур среды [20]. В частности, наблюдались ее значимое повышение в ноябре–декабре, снижение в январе–феврале и последующее возрастание в марте.

Содержание каротиноидов (Кар) в хвое ряда вечнозеленых видов древесных растений, в том числе сосны обыкновенной, увеличивается в зимний период [15, 24, 30]. Данное явление объясняется возрастанием роли каротиноидов в защите хлорофиллов от окисления и фоторазрушения в условиях низких температур среды. Влияние теплового поля газового факела проявляется также в изменении сезонной динамики размеров каротиноидного комплекса хлоропластов у деревьев, растущих вблизи факела [24].

Исследования сезонных изменений активности гваякол-зависимой пероксидазы хвой деревьев сосны обыкновенной на территории Предбайкалья показали, что минимум активности наблюдается в январе–феврале [22]. В марте происходит активация этого фермента с достижением максимальных значений летом и снижением осенью, в сентябре–ноябре сохраняется уровень отдельных летних значений. Сезонные динамики пероксидазной активности отличаются у хвой разного возраста и зависят от местоположения объекта.

Важной характеристикой состояния АОС фотосинтезирующих клеток является содержание обладающих антиоксидантной и антирадикальной активностью флавоноидов, в том числе наиболее восстановленных – катехинов и менее восстановленных – флавонолов (Фл). Эти метаболиты локализуются преимущественно в вакуолях и участвуют в нейтрализации активных форм кислорода [12]. Содержание фенольных соединений зависит, помимо стресса, от температуры среды и аридности климата [21, 28].

Значительную роль в работе АОС играет также аскорбиновая кислота (АК), которая в качестве эффективного восстановителя участвует в антиокислительных реакциях, протекающих как в хлоропластах, так и в цитозоле. От ее содержания

зависят устойчивость клеток и адаптация растений в целом к изменению условий среды (температура, влагообеспеченность и др.) [17]. АК принимает участие в процессах разложения образуемой супероксиддисмутазой перекиси водорода, а также в функционировании зеаксантин-виолоксантинового цикла [19, 25].

Перечисленные компоненты АОС хвои входят в число веществ, участвующих в работе наиболее важных звеньев сети антиокислительных процессов в клетках хвои. Накопление этих веществ у растений разных таксономических групп, участие в реакциях на стрессовые условия и способность сохранять активность при отрицательных температурах относительно хорошо исследованы. В то же время вопрос о состоянии АОС и изменениях активности биохимических процессов в листьях хвойных вечнозеленых растений бореальной зоны в осенне-зимний период изучен слабо.

Глобальные изменения климата на региональном уровне (в Западной Сибири) проявляются в его потеплении на $+0,42$ °C за 10 лет в период 1976–2020 гг. [1]. При проведении экофизиологического исследования влияния этого фактора на растения перспективным является изучение состояния вечнозеленых древесных растений, произрастающих непосредственно в зонах теплового влияния длительно функционирующего факела сжигания нефтяного газа [10]. Территория вокруг факела может рассматриваться в качестве модели действия на растения потепления климата.

При планировании нашего исследования было выдвинуто 3 рабочих гипотезы:

тепловое поле газового факела в условиях низких температур влияет на водный обмен и состояние АОС хвои сосны обыкновенной; сезонная трансформация водного обмена и характеристик состояния АОС хвои в течение отличающегося низкими температурами среды периода «осень–зима–весна» зависит от расстояния от деревьев до факела, которое определяет параметры теплового поля;

повышение температуры среды в зоне влияния факела в осенне-зимний период приводит к уменьшению количества влаги в хвое, что вызывает состояние окислительного стресса в клетках;

в АОС хвои сосны обыкновенной существуют взаимосвязи между отдельными компонентами; характеристики этих взаимосвязей трансформируются из-за изменений условий среды при удалении от газового факела.

При проверке этих гипотез учитывалось следующее. Гипотеза 1 будет подтверждена, если сезонная динамика общего содержания воды (ОВ) в хвое (ключевого показателя состояния водного обмена) и показателей состояния АОС хвои зависит от удаления от факела, а также если будут выявлены закономерности, объясняемые влиянием факела (зависимостью от расстояния до него). Подтверждением гипотезы 2 станет уменьшение ОВ хвои при приближении к факелу и сопровождение этого эффекта статистически значимым изменением содержания отдельных компонентов АОС, указывающим на увеличение ее активности. Гипотеза 3 будет доказана, если анализ данных позволит установить наличие каузальных или корреляционных связей между сезонной динамикой содержания отдельных компонентов АОС хвои на разном удалении от факела и их закономерную трансформацию при изменении расстояния до него.

Выдвинутые гипотезы определяют цель работы – исследовать сезонные изменения в период низких температур и характер корреляционных связей со-

держания ОВ в хвое, ее пероксидазной активности (АП), количества отдельных компонентов АОС: Кар, АК, катехинов (Кат) и Фл – у деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в градиенте условий среды, формируемых в зоне влияния теплового поля газового факела (на разном удалении от него) на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (Россия).

Объекты и методы исследования

Объекты изучения расположены на территории Покачевского участкового лесничества Мегионского лесничества Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Климат региона континентальный. Среднегодовая температура воздуха составляет $-3,6$ °С, среднегодовое количество осадков – 492 мм. Исследования проводили в 2004–2005 гг. В этот период самым холодным месяцем был декабрь (средняя температура -25 °С). Согласно данным Нижневартовской метеостанции, наименьшее количество осадков выпало в январе, а наибольшее – в сентябре–октябре и в апреле–мае (рис. 1). Среднедекадные температуры среды приведены ранее [24].

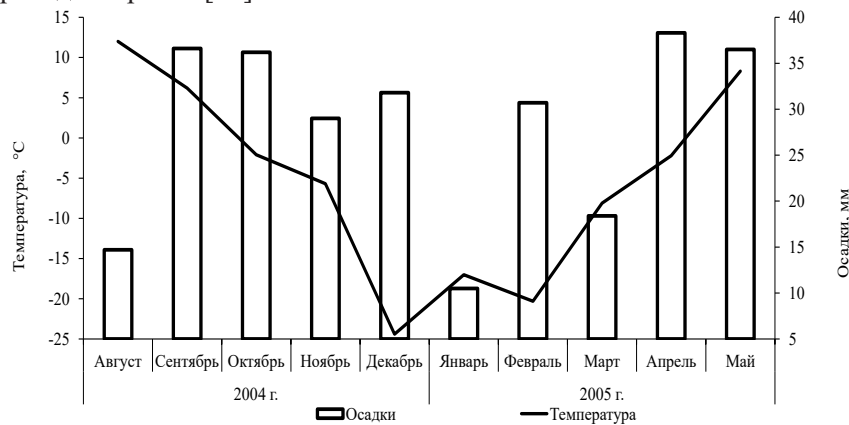


Рис. 1. Среднемесячные температуры воздуха и количество осадков в период проведения исследований

Fig. 1. Average monthly air temperatures and precipitation amount during the study period

Объектом исследований являлись молодняки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) естественного возобновления, произрастающие около газового факела 4-й дожимной насосной станции Покачевского месторождения нефти. При выборе объекта были учтены сведения о составе воздуха и о наличии дополнительных факторов, включая техногенное изменение территории и наличие порубочных остатков, образовавшихся при создании факела (проведение комплекса противопожарных мероприятий и строительство коммуникаций). Проанализированы материалы производственного контроля в области охраны окружающей среды, выполненные с апреля по октябрь 2006 г. предприятиями нефтегазодобычи на территории Нижневартовского района. Химико-аналитическая работа проведена по сертифицированным методикам. В районе исследований в этот период эксплуатировалось несколько десятков факелов.

В нескольких точках на расстояниях до 1000 м от факелов в пробах воздуха были измерены концентрации CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, CH₃OH, углеводородов, сажи и пыли. Анализ данных показал, что статистически значимой корреляционной зависимости между приземной концентрацией перечисленных компонентов и расстоянием от факелов, а также повышения уровня загрязнений в зоне радиусом до 150 м от факела по сравнению с фоном не наблюдается. Такие результаты позволяют заключить, что состав атмосферного воздуха на секциях пробной площади стабилен и градиенты уровней загрязнения среды отсутствуют и поэтому не могут являться неучтенным фактором, влияющим на состояние хвои.

В древостое по стандартной методике (ОСТ 56-69-83) заложена постоянная пробная площадь, включающая 7 секций (I–VII) шириной 10 м и длиной 60 м каждая. Секции расположены перпендикулярно линии, направленной на северо-восток (против доминирующих ветров) от факела. Ближние границы изучавшихся секций I, III и VII удалены на 70, 90 и 130 м от факела соответственно. Тип леса – сосняк лишайниковый, древостой одноярусный, чистый 10С, возраст 12–15 лет, III–IV классы бонитета, густота 2900–6400 шт./га. На разных секциях средние диаметры и высоты составляют 2,5–5,6 см и 1,3–2,3 м соответственно [10]. Варьирование таксационных характеристик связано с влиянием на них градиентов условий среды, создаваемых факелом и неоднородностью микрорельефа местности.

Основная характеристика теплового поля факела, разность температур среды, составляет до 1,5 °С на высоте 1,3 м от уровня земли (воздух) и до 6 °С (верхний слой почвы) между ближней секцией I и дальней секцией VII (фоновая) [10]. Неоднородность микрорельефа и растительности, а также суточные и сезонные изменения ветра и инсоляции не позволяют детализировать значения температуры в течение длительного периода времени, однако увеличение температуры с уменьшением расстояния до факела достоверно. В связи с этим влияние факела на хвою деревьев изучали с принятием во внимание удаления отдельных секций от него.

Сформировавшуюся в предыдущий год хвою для исследований собирали 1–2 раза в месяц с 28.08.2004 по 11.05.2005 на секциях I, III и VII с разных частей побегов боковых ветвей обращенной к факелу средней части кроны у 5 средних по диаметру и высоте деревьев. Образцы хранили в течение суток при температуре воздуха и влажности, соответствующих температуре и влажности в момент сбора. Для анализа использовали метод средней пробы. Измерение отдельных характеристик проводили в 3 биологических повторностях.

Процент ОВ в хвое определяли весовым методом по разности между массами сырой и абсолютно сухой хвои с последующим пересчетом. Массу абсолютно сухой хвои устанавливали после сушки при 105 °С. Определение Кат и Фл в хвое осуществляли фотометрически (фотоэлектроколориметр КФК-2МП, ЗОМЗ, Россия) после их экстракции 50 %-м этиловым спиртом: Кат – по реакции с ванилиновым реактивом [8], Фл – с хлоридом алюминия [4]. Содержание АК в хвое устанавливали титриметрически по реакции Тильманса с 2,6-дихлорфенолиндофенолятом натрия [9]. АП хвои – фотометрически по скорости ферментативной реакции окисления бензидина пероксидом водорода с образованием бензидиновой сини [2].

Полученные данные о физиолого-биохимических показателях состояния хвои анализировали статистически с использованием стандартного пакета Statistica 8.0. На графиках сезонных динамик измеренных показателей приведены средние величины и стандартные ошибки. Для оценки отличий сезонных динамик показателей состояния хвои на разных секциях применяли непараметрический критерий Манна–Уитни, при изучении характера их взаимосвязей были проведены факторный (с использованием метода главных компонент) и корреляционный анализ. При анализе взаимосвязей показателей АОС хвои (за исключением ОВ) использовали модель множественной линейной регрессии.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование содержания ОВ в хвое выявило, что этот показатель в течение всего рассматриваемого периода изменяется в пределах 52–61 %. Значительных отличий между секциями в сезонной динамике ОВ в хвое не наблюдается (рис. 2). На секции I в течение всего периода содержание ОВ, как правило, на 0,5–1,0 % выше, чем на секциях III и VII. Сравнение данных по ранговому критерию Манна–Уитни показало, что указанный факт достоверен ($p < 0,001$), тогда как отличий между последними двумя секциями не наблюдается. В результате корреляционного анализа не установлено связей ОВ и среднедекадных значений температуры среды, однако наблюдается опосредованное, отражающееся на общем физиологическом состоянии хвои влияние температуры и осадков. С последней декады августа до конца октября на фоне снижения температуры среды и отсутствия дефицита влаги в виде осадков (см. рис. 1) происходит последовательное уменьшение ОВ до минимальных за период измерений значений. В ноябре, когда среднесуточные температуры составляют около $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, этот показатель возрастает на 2–3 % и далее стабилизируется вплоть до конца апреля. В марте–апреле температура воздуха повышается, приближается к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и становится положительной в мае при значительном количестве осадков. В результате этого в начале месяца количество ОВ в хвое резко возрастает.

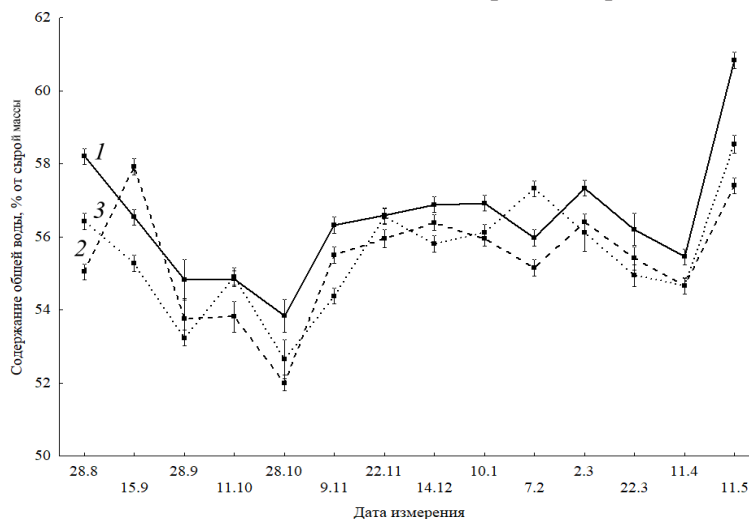


Рис. 2. Сезонная динамика содержания общей воды в хвое на секциях I (1), III (2) и VII (3)

Fig. 2. Seasonal dynamics of total water content in needles on research sites I (1), III (2) and VII (3)

Результаты изучения сезонной динамики Кар в хвое деревьев, растущих на разном удалении от факела, описаны ранее [24]. Было установлено, что Кар в хвое увеличивается на всех секциях в сентябре и сохраняется на повышенном уровне до начала мая на секциях I и III, а на секции VII неоднократно повышается и понижается в течение остального периода исследований (рис. 3). На секции I в большинстве случаев содержание Кар выше, чем на секции VII. Корреляции сезонной динамики Кар в хвое с температурой воздуха не наблюдается на всех секциях. В настоящем исследовании эти сведения используются при анализе характера взаимосвязей работы защитных пигментов каротиноидного комплекса с функционированием других компонентов АОС хвои.

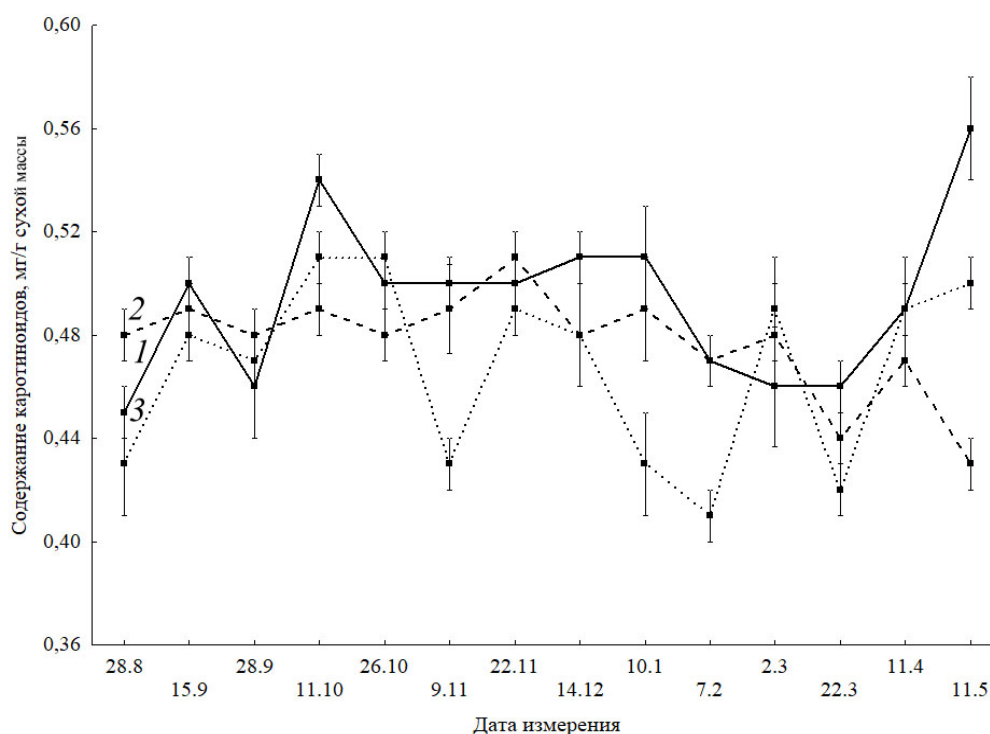


Рис. 3. Сезонная динамика содержания каротиноидов в хвое на секциях I (1), III (2) и VII (3) [24]

Fig. 3. Seasonal dynamics of carotenoids content in needles on research sites I (1), III (2) and VII (3) [24]

В течение исследуемого периода выявлены значительные колебания АП хвои. АП повышена в сентябре–первой половине октября, декабре и, в меньшей степени, в марте–мае (рис. 4). Корреляция показателя со среднедекадными значениями температуры среды не установлена. Сезонные динамики АП на 3 секциях по наличию отдельных фаз колебаний отличаются незначительно, однако изменения величин АП по амплитуде колебаний в большинстве случаев выше на секции I, чем на секциях III и VII. Это отличие наиболее достоверно между секциями I и III ($p < 0,07$) и менее значимо при всех остальных вариантах сравнения секций ($p = 0,26-0,38$).

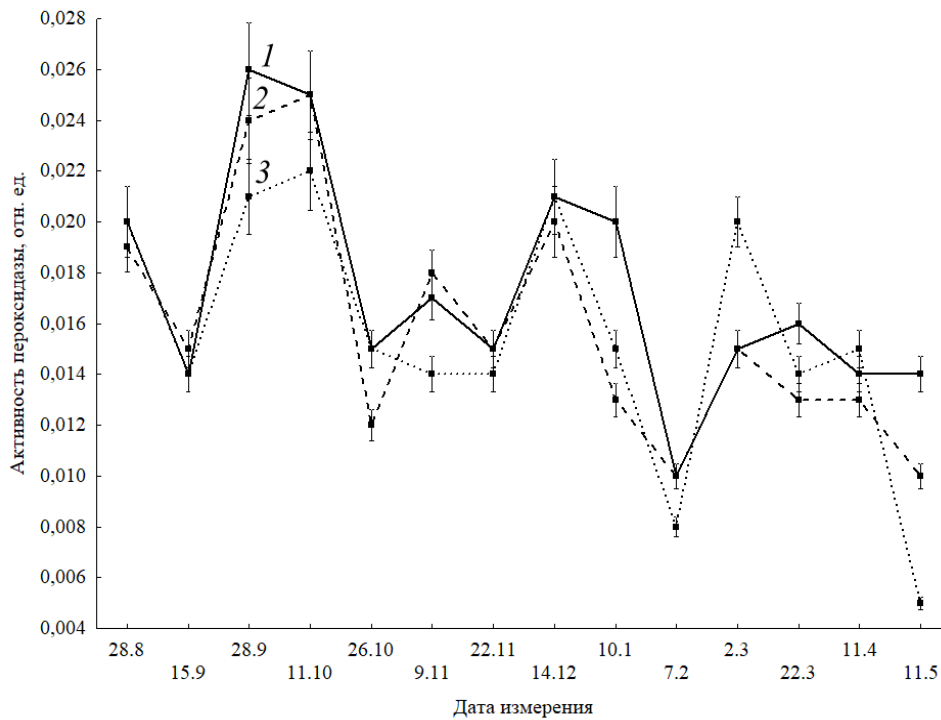


Рис. 4. Сезонная динамика пероксидазной активности в хвое на секциях I (1), III (2) и VII (3)

Fig. 4. Seasonal dynamics of peroxidase activity in needles on research sites I (1), III (2) and VII (3)

Общая направленность сезонной динамики Кат в хвое произрастающих на разном удалении от факела деревьев характеризуется увеличением этого показателя в конце сентября–октябре (рис. 5). Данный эффект наиболее выражен на секциях I и VII, где после снижения содержания Кат в ноябре–декабре, оно повышается в январе–феврале. Кат в хвое на секции III зимой также увеличивается, но амплитуда изменений этого показателя меньше, чем на других секциях. Его значения уменьшаются в марте–апреле и резко увеличиваются в мае. Таким образом, Кат в хвое на 3 секциях варьирует в течение всего периода исследований, а наибольшие амплитуды изменений показателя наблюдаются на секциях I и VII. В течение всего периода исследования в большинстве случаев значения Кат в хвое на секции I выше или не отличаются от значений на секции VII. Сезонная динамика содержания Кат достоверно отличается между секциями I и III ($p < 0,01$) и III и VII ($p < 0,05$), однако не отличается между секциями I и VII.

Сезонная динамика Фл в хвое сосны также имеет колебательный характер, однако величины изменений и абсолютные значения этого показателя меньше, чем для Кат в хвое (рис. 6). Вблизи факела Фл в течение всего периода исследований ниже, чем на других секциях. На секции VII уровень Фл наибольший, а на секции I снижается в конце сентября–начале октября и вновь возрастает в конце октября.

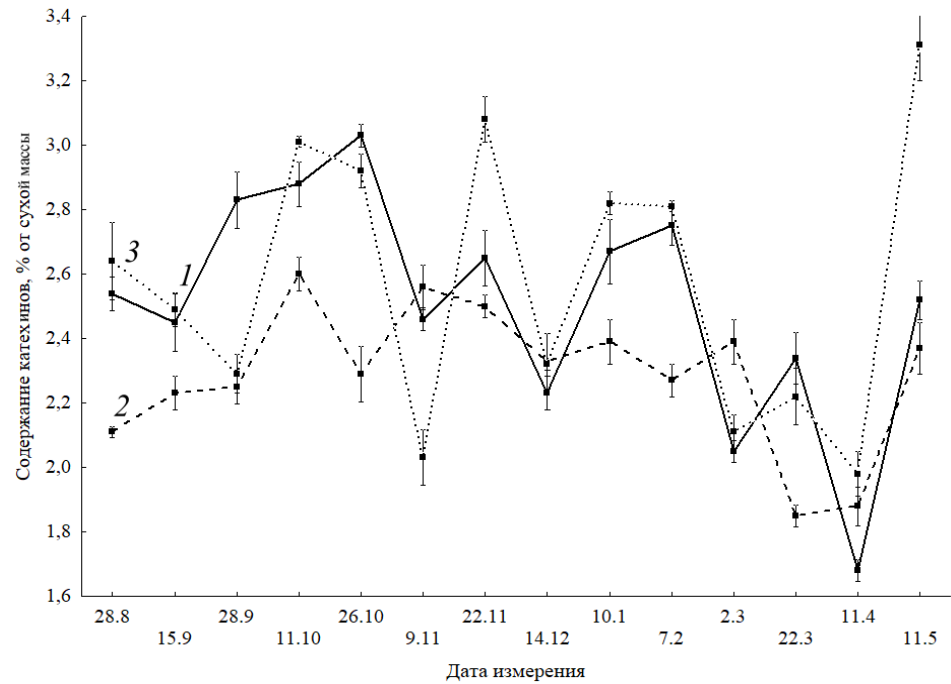


Рис. 5. Сезонная динамика содержания катехинов в хвое на секциях I (1), III (2) и VII (3)

Fig. 5. Seasonal dynamics of catechins content in needles on research sites I (1), III (2) and VII (3)

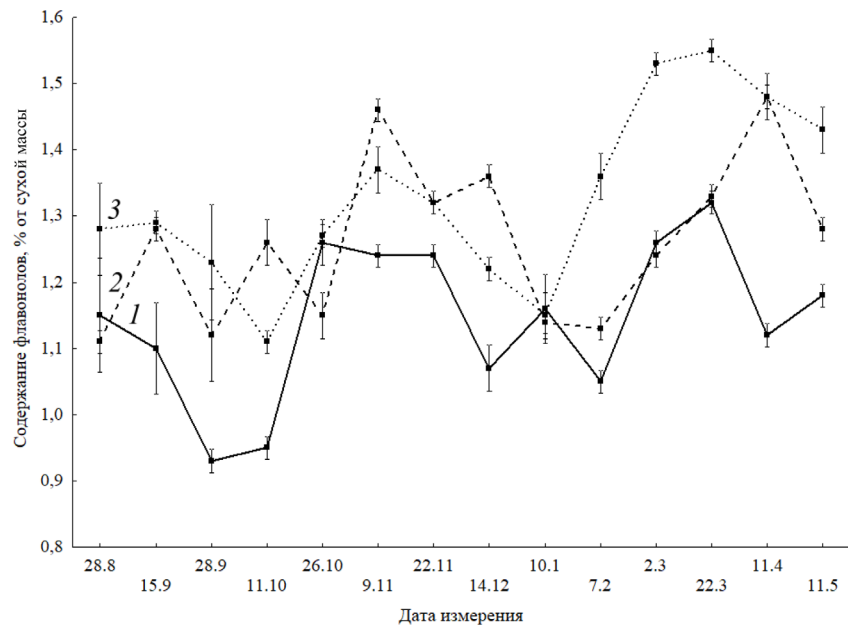


Рис. 6. Сезонная динамика содержания флавонолов в хвое на секциях I (1), III (2) и VII (3)

Fig. 6. Seasonal dynamics of flavonoids content in needles on research sites I (1), III (2) and VII (3)

На секции III показатель Кат имеет промежуточные значения. Корреляции содержания обеих групп флавоноидов (Кат, Фл) в хвое по отдельности со среднедекадными значениями температуры среды не установлено. Несмотря на различия в уровнях Фл в хвое, а также в сроках и продолжительности их подъемов и спадов на отдельных секциях, общим для всех 3 сезонных динамик Фл в хвое является наличие 2 подъемов – в ноябре и марте. Сезонные динамики Фл на секции I достоверно отличаются от остальных ($p < 0,001$), а также на секции III от секции VII ($p < 0,05$).

Изучение сезонной динамики АК в хвое сосны показало, что общая направленность на всех секциях одинакова. Наблюдается максимум в ноябре–декабре (рис. 7), при этом различия в величинах АК в хвое между всеми секциями в данный период наиболее выражены. Наименьшие значения АК в хвое характерны для деревьев, произрастающих вблизи факела (секция I), а максимальные – для хвои на секции III. Весной, в апреле–начале мая, также наблюдается увеличение показателя. Несмотря на выявленные отличия между секциями по содержанию АК в хвое в ноябре, сравнение сезонных динамик этого показателя на разных секциях достоверной связи с удалением от факела не выявило. Также отсутствует корреляция содержания АК со среднедекадными значениями температуры среды.

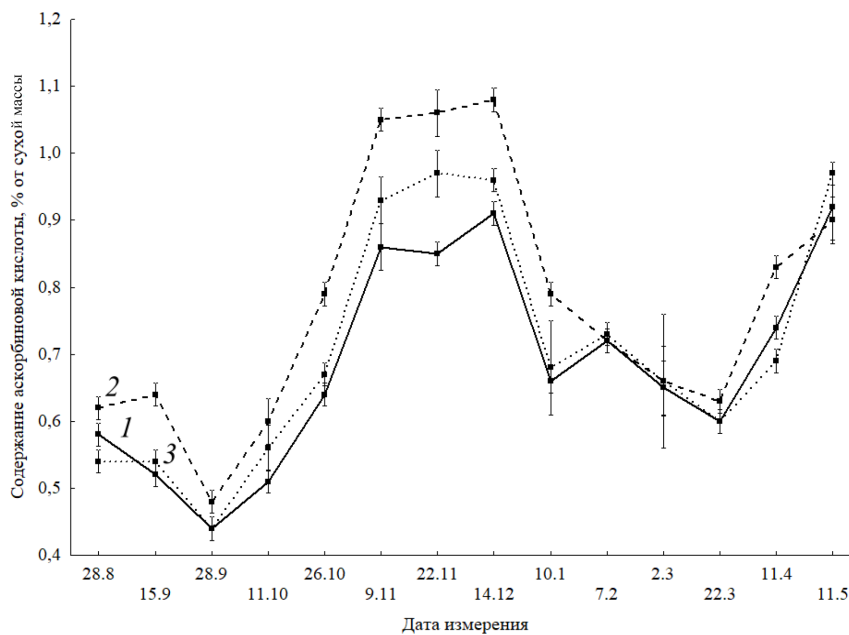


Рис. 7. Сезонная динамика содержания аскорбиновой кислоты в хвое на секциях I (1), III (2) и VII (3)

Fig. 7. Seasonal dynamics of ascorbic acid content in needles on research sites I (1), III (2) and VII (3)

Проведен факторный анализ совокупностей сезонных динамик всех 5 показателей состояния АОС хвои на каждой из 3 изучаемых секций, целью которого в соответствии с процедурой анализа было выявление 5 латентных факторов. Результаты показали, что 1-й и 2-й факторы включают 68,9; 70,6 и 66,5 % дисперсии совокупности значений признаков (всех изучавшихся показателей состояния

АОС) на секциях I, III и VII соответственно. Вклад фактора 1 на секциях I, III и VII превышает вклад фактора 2 на 16,1; 4,4 и 3,5 % соответственно. Сравнение максимальных долей отдельных признаков для каждого из факторов 1 и 2 показало, что состав доминирующих в факторах групп признаков на разных секциях не совпадает. При этом в данных группах в разных сочетаниях встречаются все 5 изучаемых признаков. В частности, для 1-го фактора на секции I доминируют АП, АК, Фл и Кат, на секции III – Фл и Кат, на секции VII – АК и АП.

Корреляционный анализ сезонных динамик показателей водного обмена и состояния АОС, проведенный отдельно по 3 секциям, выявил, что каждый из исследуемых признаков коррелирует с разным количеством других характеристик АОС на одной секции (см. таблицу). Наименьшее количество связей наблюдается у ОВ и Кар в хвое (все связи с Кат, АК и АП). Из них только ОВ в хвое коррелирует с 3 другими показателями на секции VII. Наибольшее количество связей у АК в хвое (со всеми измеренными показателями на секции I) и АП хвои (со всеми показателями, кроме Кар в хвое на секции VII). При этом коэффициент корреляции r составляет от $-0,31$ (секция I, связь АК–Кат) до $0,58$ (секция III, связь АК–Фл). На секции III все коэффициенты корреляции положительны. Отрицательные корреляции наблюдаются на секции I между Кат и АК, АП и Фл, АП и АК, а на секции VII – между Кат и Фл, АП и Фл, АП и Кат, АП и АК.

Коэффициенты корреляции между сезонными динамиками показателей состояния АОС хвои
Correlation coefficients between seasonal dynamics of needles antioxidant system state indicators

Показатель	Секция	Общая вода	Каротиноиды	Флавонолы	Катехины	Аскорбиновая кислота
Общая вода	I	1,00				
	III					
	VII					
Каротиноиды	I	0,27	1,00			
	III	-0,14				
	VII	-0,18				
Флавонолы	I	0,24	-0,13	1,00		
	III	0,28	-0,06			
	VII	0,19	-0,13			
Катехины	I	-0,26	0,18	-0,24	1,00	
	III	0,07	0,51	-0,08		
	VII	0,44	0,26	-0,42		
Аскорбиновая кислота	I	0,48	0,43	0,38	-0,31	1,00
	III	0,27	0,16	0,58	0,33	
	VII	0,46	0,10	0,16	0,21	
Активность пероксидазы	I	-0,23	0,05	-0,55	0,29	-0,42
	III	-0,26	0,43	-0,03	0,31	-0,25
	VII	-0,50	0,19	-0,40	-0,39	-0,45

Примечание: Полужирным шрифтом отмечены достоверные значения ($p < 0,05$).

Ввиду установленного сложного характера взаимосвязей изучаемых показателей состояния АОС хвой дальнейший анализ данных о сезонной динамике показателей проведен с помощью множественного регрессионного анализа. Исследовали связь АП хвой, которая рассматривалась в качестве зависимой переменной, с 4 остальными характеристиками АОС. Установлено, что на секции I коэффициент множественной корреляции $R = 0,62$ значим ($F = 5,49$, $p < 0,002$). Коэффициенты регрессии при стандартизованных переменных (стандартизованные коэффициенты), отражающие вклад отдельных независимых переменных (Кар, Фл, Кат и АК) в предсказываемое значение зависимой переменной, составляют 0,10; -0,41; 0,09 и -0,28 соответственно. На секции III R выше, чем на секции I, и составляет 0,66 ($F = 7,06$, $p < 0,001$). Стандартизованные коэффициенты для перечисленных независимых переменных больше, чем на секции I, и равны 0,36; 0,41; 0,39 и -0,68 соответственно. На секции VII $R = 0,82$ ($F = 18,73$; $p = 0,000$), т. е. выше, чем на секциях I и III, а стандартизованные коэффициенты для соответствующих независимых переменных составляют 0,32; -0,60; -0,67 и -0,24. Результаты анализа стандартизованных коэффициентов свидетельствуют о наличии значимой отрицательной связи АП и АК в хвое на всех 3 секциях.

Анализ результатов изучения ОВ в хвое показал, что на секции I величины ОВ в хвое, как правило, в течение всего периода исследований выше, чем на более удаленных от факела секциях. Эти данные подтверждают гипотезу I о влиянии факела на состояние водного обмена. Указанная особенность сезонных динамик ОВ в хвое, а также наличие спада и подъема данного показателя соответственно осенью и в начале зимы говорят о поддержании в указанный период активного физиологического состояния клеток хвой на всех секциях. Наблюдаемые проявления адаптации водного обмена хвой к действию низких температур обуславливаются, по-видимому, регуляцией баланса содержания свободной и связанной воды в клетке [26], функционированием механизмов переноса влаги в хвою из водного пула тканей побегов при оттепелях и непосредственным поступлением воды атмосферных осадков через поверхностные ткани хвой сосны [16]. Функционирование описанных приспособительных механизмов удовлетворительно объясняет сезонные динамики ОВ в хвое, включая их согласованность с изменениями температуры среды и количества осадков. Торможение водного транспорта от корней при установлении в сентябре-октябре низких температур воздуха и замерзании почвы приводит в этот период к снижению ОВ до минимума. Наблюдаемое в ноябре повышение ОВ в хвое с выходом на плато обуславливается поступлением влаги из тканей древесины побегов, так как при температурах среды около -5 °C внутриклеточный водный раствор не замерзает. Достижимый в ноябре уровень оводненности хвой составляет около 56 % и сохраняется до сопровождаемого выпадением дождей потепления в мае. Этот уровень является, вероятно, характерным для зимнего состояния клеток и тканей оптимумом, который обеспечивает в период низких температур среду для протекания антиокислительных процессов в клетках. Предполагавшееся снижение этого показателя физиологического состояния хвой, рассматриваемого в качестве индикатора возможного наличия окислительного стресса, в градиенте действия теплового поля факела не наблюдается.

Сезонные изменения изученных показателей состояния АОС хвой по сравнению с ОВ имеют более сложный вид. Этот факт согласуется с наблюдавшимися изменениями АП хвой сосны обыкновенной [21] и свидетельствует

о сохранении активности защитных механизмов клеток хвои в период низких температур среды. Сопоставление сезонных динамик всех 5 характеристик состояния АОС позволяет выделить следующие закономерности:

их величины неоднократно (2–3 раза) повышаются и понижаются в течение периода исследований и не совпадают на разных секциях; сроки проявления подъемов и спадов существенно отличаются у отдельных показателей (в том числе Кат и Фл), но, как правило, примерно одинаковы на разных секциях;

сезонные динамики всех показателей состояния АОС хвои не коррелируют со среднедекадными температурами среды;

на ближней к факелу секции I сезонные динамики всех показателей достоверно отличаются от соответствующих динамик на остальных секциях;

на секции I значения Кар и АП в большинстве случаев выше, а Фл и АК ниже, чем на секциях III и VII.

Из перечисленных закономерностей следует, что АОС хвои сосны сохраняет активность в течение периода исследований и на содержание ее отдельных компонентов оказывает влияние факел. При этом отличий сезонной динамики изученных показателей состояния АОС и ОВ в хвое на разном удалении от факела, указывающих на существование состояния окислительного стресса в хвое, не наблюдается (гипотеза 2 не подтверждена). Функционирование изученных компонентов АОС хвои относительно независимо друг от друга и прямых указаний на существование причинно-следственных связей между ними не установлено.

Противоречие между отсутствием корреляций измеренных показателей состояния АОС со среднедекадной температурой среды и существованием отличий их сезонной динамики на разном удалении от факела объясняется, во-первых, методической причиной – высокой пространственной и суточной вариабельностью локальной температуры при сохранении общих трендов температурного поля летом, установленных в результате одноразовых измерений [11]. Эта вариабельность не позволяет провести непосредственный анализ измеренных значений зависимости показателей состояния АОС хвои от локальной температуры. Во-вторых, отличия между секциями являются следствием накопленных за почти 2 года изменений физиологического состояния ассимиляционного аппарата в результате небольших различий в температуре воздуха и верхнего слоя почвы на разном удалении от факела, а не только в период низких температур.

Результаты факторного анализа сезонных динамик показателей состояния АОС хвои свидетельствуют об отсутствии среди них доминирующих на всех секциях признаков или их групп. Этот факт указывает на относительно одинаковый вклад в работу АОС хвои процессов, определяющих величины ее отдельных характеристик. Проведенный анализ данных выявил наличие корреляционной связи ОВ в хвое с АК на секции I и с 3 активными в водной среде характеристиками состояния АОС только на фоновой секции VII, что согласуется с предположением об активном механизме регуляции баланса форм свободной и связанной воды в клетках в период низких температур среды. АК коррелирует с ОВ и другими характеристиками состояния АОС хвои на секции I, а АП хвои – на секции VII (за исключением Кар). При этом в результате корреляционного анализа не было установлено наличия существующих одновременно на всех 3 секциях, т. е. независимых от влияния факела, взаимосвязей отдельных пока-

зателей состояния АОС хвои. Это дополнительно указывает на отличие физиологических состояний хвои на разном удалении от факела, а также позволяет высказать предположение об особой роли АК и АП в работе АОС хвои.

Множественный регрессионный анализ позволил установить, что с удалением от факела наблюдается повышение коэффициента множественной регрессии и его достоверности. Этот факт свидетельствует об усилении взаимосвязи изучаемых признаков и указывает на увеличение согласованности работы компонентов АОС в целом при приближении условий среды к фоновым. Объяснение данной закономерности и установленных особенностей корреляций показателей состояния АОС хвои на разном удалении от факела заключается, по-видимому, в том, что при фоновых условиях среды адаптация деревьев в результате действия естественного отбора максимальна. Вследствие этого у хвои деревьев на расположенной вне зоны теплового влияния факела секции VII функционирование компонентов АОС наиболее согласовано. На секции I влияние факела наивысшее, что обеспечивает соответствующее изменение (уменьшение относительно секции VII) сопряженности адаптационных процессов. На секции III температурные условия являются переходными и менее стабильны, так как действие теплового поля факела здесь слабее и чаще, чем на секции I, и дополнительно ослабляется такими факторами, как ветер, осадки, микрорельеф, расположение деревьев. В связи с этим согласованность работы компонентов АОС хвои является промежуточной.

В отличие от корреляционного анализа, множественный регрессионный анализ показал наличие отрицательной корреляции между АП и АК в хвое на всех секциях, включая III. Это указывает на более значимую роль АК в работе АОС клетки по сравнению с другими компонентами. Известно, что данное соединение является медленно окисляемым субстратом пероксидаз и способно активировать фермент как при высоких, так и при низких концентрациях, увеличивая скорость аэробных процессов [6]. В связи с этим выявленная отрицательная связь АП–АК обусловлена, скорее всего, обратной зависимостью между активностью фермента и количеством субстрата в ферментативных реакциях. Данное предположение удовлетворительно объясняет и факт наличия отрицательных коэффициентов парной корреляции, описывающих, как правило, характер связи содержания компонентов АОС хвои с АП. Установленная тенденция последовательного увеличения рассогласования функционирования АОС хвои с приближением к факелу обусловлена, по-видимому, его усиливающимся модифицирующим влиянием на сезонные адаптационные процессы в клетках хвои.

Выводы

1. Результаты изучения сезонных изменений содержания общей воды, каротиноидов, катехинов, флавонолов, аскорбиновой кислоты и пероксидазной активности в хвое и их взаимосвязей подтверждают предположение о влиянии газового факела на состояние антиокислительной системы хвои сосны обыкновенной. Это влияние, отражающееся на показателях физиологического состояния хвои, максимально на ближней к факелу секции и наблюдается в течение периода «осень–зима–весна», проявляясь в виде увеличения пероксидазной активности, содержания общей воды и каротиноидов и уменьшения количества флавонолов и аскорбиновой кислоты по сравнению с величинами на более уда-

ленных секциях. При этом монотонных зависимостей показателей состояния антиокислительной системы хвои от расстояния до факела не отмечено. Сезонная динамика изученных показателей не коррелирует с температурой среды, однако тепловое поле факела влияет на их характеристики. По-видимому, она оказывает не прямое действие на процессы регуляции активности антиокислительной системы хвои в изучаемый период, а ее влияние на показатели состояния хвои опосредованно, в том числе из-за особенностей накопления отдельных вторичных метаболитов и обратимых изменений состояния воды в клетках.

2. Не подтверждено предположение о возникновении состояния окислительного стресса в хвое деревьев сосны обыкновенной, произрастающих в зоне влияния газового факела. В течение всего периода исследований водный обмен и антиокислительная система хвои сохраняют активность, обеспечивая протекание адаптационных физиолого-биохимических процессов. В градиенте действия теплового поля факела не наблюдается дополнительного по сравнению с фоном снижения общей воды в хвое, рассматриваемого в качестве индикатора возможности наступления окислительного стресса. Кроме того, не выявлено принципиальных отличий сезонных динамик показателей состояния антиокислительной системы хвои на разном удалении от факела, которые могли бы указывать на наличие стресса.

3. Факторный, корреляционный и множественный регрессионный анализ данных подтверждают предположение о наличии взаимосвязей между изученными компонентами антиокислительной системы хвои деревьев сосны обыкновенной и о влиянии на них условий среды, формируемых в градиенте теплового поля газового факела. Взаимосвязи между изученными показателями состояния антиокислительной системы хвои изменяются с удалением от факела и, по-видимому, имеют не только линейный характер. Вклады отдельных изученных компонентов в общую работу антиокислительной системы хвои в период «осень–зима–весна» относительно независимы, при этом доминирующих компонентов среди них не наблюдается. Также не наблюдается повторяющихся на всех секциях и закономерно изменяющихся с увеличением расстояния от факела линейных корреляций показателей состояния антиокислительной системы хвои, за исключением отрицательной связи пероксидазной активности с количеством аскорбиновой кислоты. Эта связь проявляется на всех расстояниях от факела и усиливается с удалением от него. Степень согласованности работы отдельных компонентов антиокислительной системы максимальна в условиях фона и уменьшается при приближении к факелу. Это объясняется, вероятно, модулирующим влиянием факела на физиолого-биохимические механизмы адаптации хвои к конкретным климатическим условиям среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет, 2019. 79 с.
A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2018. Moscow, ROSHYDROMET Publ., 2019. 79 p. (In Russ.).
2. Землянухина О.А., Калаев В.Н., Воронина В.С. Сравнительный анализ методов определения активности и изоферментного спектра пероксидаз различного происхождения // Успехи современного естествознания. 2017. № 9. С. 13–22.

Zemlyanukhina O.A., Kalayev V.N., Voronina V.S. Comparative Analysis of the Methods Used to Determine the Activity and Isozyme Spectrum of the Different Origin Peroxidases. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2017, no. 9, pp. 13–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.36534>

3. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высш. шк., 2005. 736 с.

Kuznetsov V.V., Dmitriyeva G.A. *Plant Physiology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005, 736 p. (In Russ.).

4. Лобанова А.А., Будаева В.В., Сакович Г.В. Исследование биологически активных флавоноидов в экстрактах из растительного сырья // Химия растит. сырья. 2004. № 1. С. 47–52.

Lobanova A.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Investigation of Biologically Active Flavonoids in Extracts from Plant Raw Materials. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2004, no. 1. pp. 47–52. (In Russ.).

5. Меньщикова Е.Б., Зенков Н.К. Антиоксиданты и ингибиторы радикальных окислительных процессов // Успехи современной биологии. 1993. Т. 113, вып. 4. С. 442–455.

Menshchikova E.B., Zenkov N.K. Antioxidants and Inhibitors of Radical Oxidative Processes. *Uspekhi Sovremennoy Biologii* = Biology Bulletin Reviews, 1993, vol. 113, no. 4, pp. 442–455. (In Russ.).

6. Рогожин В.В., Верхотуров В.В. Аскорбиновая кислота – медленно окисляемый субстрат пероксидазы хрена // Биохимия. 1997. Т. 62, вып. 12. С. 1678–1682.

Rogozhin V.V., Verkhoturov V.V. Ascorbic Acid Is a Slowly Oxidized Substrate of Horseradish Peroxidase. *Biokhimiya* = Biochemistry, 1997, vol. 62, no. 12, pp. 1678–1682. (In Russ.).

7. Титов А.Ф., Акимова Т.В., Таланова В.В., Топчиева Л.В. Устойчивость растений в начальный период действия неблагоприятных температур. М.: Наука, 2006. 143 с.

Titov A.F., Akimova T.V., Talanova V.V., Topchiyeva L.V. *Plant Resistance in the Initial Period of Exposure to Unfavorable Temperatures*. Moscow, Nauka Publ., 2006, 143 p. (In Russ.).

8. Федуряев П.В., Скрыпник Л.Н., Масленников П.В., Чупахина Г.Н., Таценко Н.А. Особенности накопления фенольных соединений в растениях некоторых видов рода *Rumex L.* // Химия растит. сырья. 2017. № 3. С. 123–130.

Fedurayev P.V., Skrypnik L.N., Maslennikov P.V., Chupakhina G.N., Tatsenko N.A. Specialty of Accumulation of Phenolic Compounds in Plants of Some Species of the Genus *Rumex L.* *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2017, no. 3, pp. 123–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201703755>

9. Цандекова О.Л., Неворова О.А., Колмогорова Е.Ю. Роль антиоксидантной системы в устойчивости сосновых насаждений в условиях породного угольного отвала // Изв. Сам. ИЦ РАН. 2013. Т. 15, № 3. С. 245–248.

Tsandekova O.L., Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. The Role of Antioxidant System in Stability of Pine Plantations in the Conditions of Rock Coal Dump. *Izvestia of RAS SamSC*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 245–248. (In Russ.).

10. Шавнин С.А., Юсупов И.А., Артемьева Е.П., Голиков Д.Ю. Влияние повышения температуры среды на формирование наземной растительности вблизи газового факела // Изв. вузов. Лесн. журн. 2006. № 1. С. 22–28.

Shavnin S.A., Yusupov I.A., Artemyeva E.P., Golikov D.Yu. The Influence of Increase of Ambient Temperature on the Formation of Terrestrial Vegetation Near a Gas Flare. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2006, no. 1, pp. 22–28. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/2006/%E2%84%961-2006.pdf>

11. Apel K., Hirt H. Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, vol. 55, no. 1, pp. 373–399. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>
12. Gould K.S., Lister C. Flavonoid Functions in Plants. *Flavonoids*, CRC Press, 2005, pp. 397–441. <https://doi.org/10.1201/9781420039443.ch8>
13. Ivanov Y.V., Savochkin Y.V., Kuznetsov V.V. Scots Pine as a Model Plant for Studying the Mechanisms of Conifers Adaptation to Heavy Metal Action: 2. Functioning of Antioxidant Enzymes in Pine Seedlings Under Chronic Zinc Action. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2012, vol. 59, pp. 50–58. <https://doi.org/10.1134/S1021443712010098>
14. Kaminska-Rozek E., Pukacki P.M. Effect of Water Deficit on Oxidative Stress and Degradation of Cell Membranes in Needles of Norway Spruce (*Picea abies*). *Acta Physiologiae Plantarum*, 2004, vol. 26, no. 4, pp. 431–442. <https://doi.org/10.1007/s11738-004-0034-7>
15. Kishchenko I.T. Dynamics of the Isoenzyme Composition of Peroxidase and Pigments in the Needles of the Introduced Species of *Picea* (L.) Karst. in the Taiga Zone (Karelia). *Arctic Environmental Research*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 129–138. <https://doi.org/10.3897/issn2541-8416.2019.19.4.129>
16. Klamerus-Iwan A., Blonska E. Canopy Storage Capacity and Wettability of Leaves and Needles: The Effect of Water Temperature Changes. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 559, pp. 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.032>
17. Mulrherjee S.P., Choudhuri M.A. Implication of Hydrogen Peroxide – Ascorbate System on Membrane Permeability of Water Stressed Vigna Seedlings. *The New Phytologist*, 1985, vol. 99, no. 3, pp. 355–360. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb03663.x>
18. Pradedova E.V., Isheeva O.D., Salyaev R.K. Classification of the Antioxidant Defense System as the Ground for Reasonable Organization of Experimental Studies of the Oxidative Stress in Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2011, vol. 58, pp. 210–217. <https://doi.org/10.1134/S1021443711020166>
19. Pukacka S., Pukacki P.M. Seasonal Changes in Antioxidant Level of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Needles Exposed to Industrial Pollution. I. Ascorbate and Thiol Content. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2000, vol. 22, no. 4, pp. 451–456. <https://doi.org/10.1007/s11738-000-0088-0>
20. Pukacka S., Pukacki P.M. Seasonal Changes in Antioxidant Level of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Needles Exposed to Industrial Pollution. II. Enzymatic Scavengers Activities. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2000, vol. 22, no. 4, pp. 457–464. <https://doi.org/10.1007/s11738-000-0089-z>
21. Roitto M.U., Ahonen-Jonnarth U., Lamppu J., Huttunen S. Apoplastic and Total Peroxidase Activities in Scots Pine Needles at Subarctic Polluted Sites. *Forest Pathology*, 1999, vol. 29, no. 6, pp. 399–410. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.1999.00175.x>
22. Romanova I.M., Zhivetyev M.A., Penzina T.A., Graskova I.A. Dynamics of *Pinus sylvestris* L. Needles Activity in Predbaikal'ye Forests. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 139–144.
23. Sancho-Knapik D., Sanz M.Á., Peguero-Pina J.J., Niinemets Ü., Gil-Pelegrín E. Changes of Secondary Metabolites in *Pinus sylvestris* L. Needles Under Increasing Soil Water Deficit. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, no. 1. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0620-7>
24. Shavnin S.A., Yusupov I.A., Marina N.V., Montile A.A., Golikov D.Yu. Seasonal Changes in Chlorophyll and Carotenoid Content in Needles of Scots Pines (*Pinus sylvestris* L.) Exposed to the Thermal Field of a Gas Flare. *Russian Journal of Plant Physiology: A Comprehensive Russian Journal on Modern Phytophysiology*, 2021, vol. 68, no. 3, pp. 526–535. <https://doi.org/10.1134/S1021443721020187>

25. Solovchenko A.E., Merzlyak M.N. Screening of Visible and UV Radiation as a Photoprotective Mechanism in Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, vol. 55, pp. 719–737. <https://doi.org/10.1134/S1021443708060010>

26. Sutinen M., Repo T., Sutinen S., Lasarov H., Alvila L., Pakkanen T. Physiological Changes in *Pinus sylvestris* Needles During Early Spring Under Sub-Arctic Conditions. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 135, no. 1–3, pp. 217–228. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00312-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00312-1)

27. Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Y.E. Adaptive Responses of Morphological Forms of the Pine (*Pinus sylvestris* L.) Under Stressful Conditions of the Northern Taiga (in the Northern Dvina Basin). *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, pp. 377–387. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040091>

28. Turunen M., Latola K. UV-B Radiation and Acclimation in Timberline Plants. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 2005, vol. 137, no. 3, pp. 390–403. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.030>

29. Willekens H., Inze D., Van Montagu M., Van Camp W. Catalases in Plants. *Molecular Breeding: New Strategies in Plant Improvement*, 1995, vol. 1, no. 3, pp. 207–228. <https://doi.org/10.1007/BF02277422>

30. Yatsko Y.N., Dymova O.V., Golovko T.K. Violaxanthin Cycle Pigment Deep Oxidation and Thermal Dissipation of Light Energy in Three Boreal Species of Evergreen Conifer Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2011, vol. 58, pp. 169–173. <https://doi.org/10.1134/S1021443711010249>

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

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-58-72

Радиальный рост ели (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) в условиях горных разработок

О.С. Барзут¹✉, канд. с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [AFN-5294-2022](https://orcid.org/0000-0002-0338-9715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-9715>

М.В. Сурсо², д-р с.-х. наук; Researcher ID: [J-2197-2018](https://orcid.org/0000-0001-7482-9848),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163000; o.barzut@narfu.ru✉

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163069; surso@fciarctic.ru

Поступила в редакцию 25.03.21 / Одобрена после рецензирования 20.06.21 / Принята к печати 23.06.21

Аннотация. Представлены результаты изучения динамики радиального роста ели, произрастающей в центральной части Беломорско-Кулойского плато вблизи потенциального источника техногенного воздействия – карьерной разработки кимберлитовых трубок на алмазном месторождении им. М.В. Ломоносова. Керны для дендрохронологического анализа были взяты с 6 опытных участков, находящихся на разном расстоянии от действующего карьера. Изменчивость годовых радиальных приростов у ели на всех участках варьировала от средней до высокой и очень высокой. У деревьев ели фиксировалась разная длительность циклов депрессий и экспрессий. На одном и том же участке динамика норм прироста у разных деревьев могла не совпадать или быть схожей в проявлениях цикличности в отдельные периоды жизни деревьев. В большинстве случаев минимальные и максимальные экстремумы наблюдались вблизи значений общеизвестных циклов солнечной активности. Между продолжительностью и повторяемостью циклов выявлена высокая обратная связь. На всех опытных участках отмечено уменьшение амплитуды радиальных приростов, начиная с 2000 г., а затем, в еще большей степени, с 2010 по 2019 г. В последние 10–20 лет в олиготрофных местообитаниях вблизи карьера у деревьев ели установлено увеличение ширины годовых колец: у 50 % исследуемых растений на данных участках отмечался выраженный подъем радиальных приростов; высокой синхронностью динамики годовых слоев отличались деревья наиболее удаленного участка. Одновременно с этим выявлено снижение максимальных значений радиальных приростов по отношению ко всему ряду наблюдений и уменьшение амплитуды приростов, возросла повторяемость относительных индексов прироста ниже нормальных значений. Можно предположить, что изменение тренда радиального роста у ели в олиготрофных местообитаниях в значительной степени обусловлено формированием депрессионной воронки и связанным с этим общим понижением уровня грунтовых вод.

Ключевые слова: ель, радиальный прирост ели, горные разработки, месторождение алмазов

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 18-05-60151). Полевые работы проведены в рамках госзадания Федеральному исследовательскому центру комплексного изучения Арктики УрО РАН (№ госрегистрации – 122011400384-2).

Для цитирования: Барзут О.С., Сурсо М.В. Радиальный рост ели (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) в условиях горных разработок // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 58–72. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-58-72>

Original article

Radial Growth of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) in the Conditions of Mining Impact

Oksana S. Barzut^{1✉}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; Researcher ID: [AFN-5294-2022](https://orcid.org/0000-0002-0338-9715), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-9715>

Mikhail V. Surso², Doctor of Agriculture; Researcher ID: [J-2197-2018](https://orcid.org/0000-0001-7482-9848), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, 163002, Russian Federation; o.barzut@narfu.ru✉

²N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, 163069, Russian Federation; surso@fciarctic.ru

Received on March 25, 2021 / Approved after reviewing on June 20, 2021 / Accepted on June 23, 2021

Abstract. A dynamic of radial growth of spruce near a quarry of kimberlite pipes is investigated in this study. The quarry is considered as a potential source of anthropogenic impact. The research takes place at the central part of the White Sea Kuloi plateau, at the diamond deposit named after M.V. Lomonosov. The wood cores for dendrochronological analysis are from six trail plots located at different distances from the active quarry. The annual radial increment of spruce in all plots ranges from medium to high or very high. It is noticed that spruce trees have different durations of depression and expression cycles. The growth rates of the trees from the same plot do not coincide, or they show similarities to certain periods of tree's life with cyclical patterns. In most cases, minimum and maximum extremes are observed near the well-known values of solar activity cycles. An inverse relationship is found between duration and repetition of the cycles. The measurements from all trail plots show a decrease in the amplitude of radial growth, which started in 2000. It took much greater extent in the period from 2010 to 2019. The samples of the spruce, which were taken from the oligotrophic habitats located near the quarry, indicate an increase of width of annual rings in the last 10–20 years. Fifty percent of them reveal a distinct radial extent. The trees from the most distant trail area are characterized by high simultaneity in the dynamics of the annual layers. Moreover, it is found a decrease in the maximum value of radial growth relative to the entire series of observations. Likewise, a reduce in the amplitude of increments is noted as a rise in the repeatability of relative growth indices below the regular values. It can be assumed that the change in the trend of radial growth in spruce in the oligotrophic habitats is mostly associated with the formation of a depression cone and, as a result, a general lowering of the groundwater level.

Keywords: spruce, radial growth of spruce, mining, diamond deposit

Acknowledgments: The studies were supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-60151). The field work was carried out within the framework of the state assignment to N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration number – 122011400384-2).

For citation: Barzut O.S., Surso M.V. Radial Growth of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) in the Conditions of Mining Impact. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 58–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-58-72>

Введение

Месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова было открыто в 1980 г., когда вскрыли кимберлитовую трубку «Поморскую», из кернов породы которой извлекли первые 38 кристаллов. Месторождение находится примерно в 100 км к северо-востоку от Архангельска и включает 6 кимберлитовых трубок: «Архангельскую», «Карпинского-1», «Карпинского-2», «Пионерскую», «Поморскую», «Ломоносова» – тянущихся цепочкой общей протяженностью около 9,5 км и представляющих собой типичные воронки взрыва с четко выраженными рас-трубами, в верхней части глубиной до 150 м [6, 20].

Месторождение расположено в центре Беломорско-Кулойского плато, в карстовом районе со сложной коммуникацией подземных вод. Уровень залегания подземных вод составляет в среднем 5–8 м, на глубине более 100 м наблюдается высокая степень их минерализации (до 15–20 г/дм³). Территория месторождения характеризуется развитой гидрографической сетью и сильной заболоченностью [3, 18].

Промышленное освоение месторождения им. М.В. Ломоносова на трубке «Архангельская» было начато в 2003 г., на трубке «Карпинского-1» – в 2007 г. Проектная глубина карьера 1-й очереди на трубке «Архангельская» – 324 м, «Карпинского-1» – 260 м, размеры карьеров (по поверхности) – 1131×1191 и 1150×1030 м соответственно. Горные работы ведутся открытым (карьерным) методом. Вывоз вскрышных пород производится во внешние отвалы, а руды – на рудные склады или на обогатительную фабрику. Для откачки подземных вод создан дренажный контур из 75 водопонижающих скважин глубиной 220 м, расстояние между скважинами – 100–200 м. Погружные насосы установлены в них на глубине 180–200 м. Общая протяженность дренажного контура водопонижающих скважин составляет около 8 км. Производительность – более 5 тыс. м³/ч. Подземные воды, просачивающиеся в карьеры (около 20 % общего объема водоотлива), и атмосферные осадки откачиваются насосными станциями, установленными на дне карьеров [2]. Отвод воды через отсеки отстаивания и фильтрующие дамбы производится в р. Золотица.

Основным экологическим фактором, негативно влияющим на растительный покров при осушении карьера, является формирование депрессионной воронки (по разным оценкам, диаметром от 6 до 15 км), которая в настоящее время наиболее активно развивается в восточном и северо-восточном направлениях, что способствует понижению уровня и загрязнению грунтовых и межпластовых подземных вод, активизации карстовых и эрозионных процессов [18, 19]. Отрицательное воздействие на лесные экосистемы также оказывают загрязнение атмосферного воздуха мелкодисперсной сапониновой пылью, вырубка лесов и загрязнение земель в промзоне предприятия.

Интрогрессивный гибрид ели европейской *Picea abies* (L.) Karst. и ели сибирской *P. obovata* Ledeb. является одним из лесообразующих хвойных видов Европейского Севера и широко используется в биоиндикационных и дендрохронологических исследованиях [1, 10, 12–16, 22–26]. Корневая система у ели поверхностного типа. Взрослые деревья чувствительны к изменениям гидрологического режима и могут служить их индикатором.

Цель работы – изучение динамики радиального роста деревьев ели, произрастающих в составе естественных старовозрастных древостоев суходольных и олиготрофных местообитаний в районе разработок алмазного месторождения им. М.В. Ломоносова.

Объекты и методы исследования

Керны деревьев ели для дендрохронологического анализа были взяты с 6 опытных участков, представляющих собой спелые и перестойные насаждения разных типов леса и расположенные на различном удалении от промзоны месторождения им. М.В. Ломоносова (рис. 1).

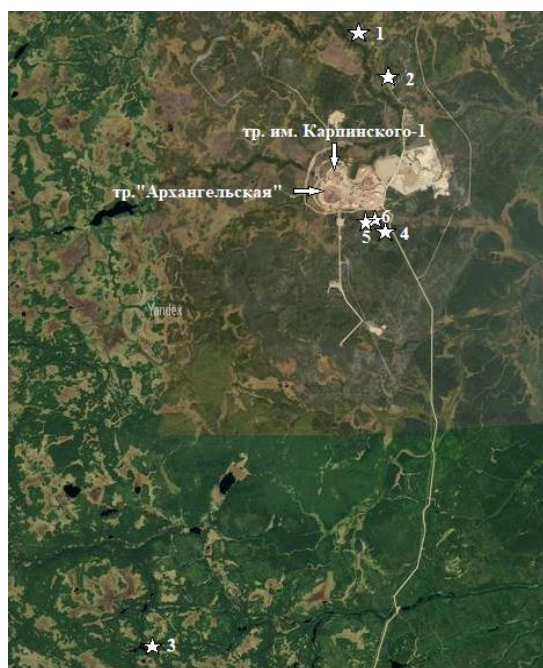


Рис. 1. Местоположение опытных участков 1–6

Fig. 1. Location of trail plots No. 1–6

Участок 1 расположен вблизи места впадения р. Белая в р. Золотица, на расстоянии примерно 8 км к северу от карьера. Перестойный разновозрастный хвоево-долгомошно-сфагновый ельник, примыкающий к верховому болоту, имеет состав 10Е и характеризуется V классом бонитета. Увлажнение – постоянное застойное избыточное.

Участок 2 лежит в 2,5 км к северу от пос. Поморье, примерно в 4,5 км к северу от карьера. Произрастающий здесь ельник является перестойным разновозрастным осоко-травяно-сфагновым, примыкает к редкостойному осоко-сфагновому сосняку. Состав – 10Е+Сед.Б, V класс бонитета. Увлажнение – постоянное слабопроточное избыточное.

Участок 3 (контроль) расположен примерно в 30 км к юго-юго-западу от карьера, является эталонным коренным северотаежным перестойным разновозрастным черничным ельником. Состав – 9Е1Б, III класс бонитета.

Участок 4 отдален на 2 км от юго-восточной части карьера и представляет собой разновозрастный ельник переходного типа – чернично-долгомошно-хвощево-сфагновый, увлажнение характеризуется как временное застойное избыточное. Состав древостоя – 8Е1С1Б, IV класс бонитета.

Участок 5 находится в 1 км к юго-востоку от карьера, на левом пологом берегу ручья Светлый. Тип леса – сосняк ерничково-можжевельниковый. Состав – 9С1Еед.Б, бонитет – IV, полнота – 0,5. Средние высота и диаметр ели – 14 м и 20 см соответственно. Подрост – 9Е1С+Б (0,5 тыс. шт./га). Подлесок представлен карликовой березой и можжевельником. В напочвенном покрове преобладают осоки, злаки, встречаются бодяк разнолистный, вереск. Моховой покров выражен слабо. Почва слабоподзолистая, среднесуглинистая, на суглинке.

Участок 6 расположен в 1,5 км к юго-востоку от карьера, на правом слабобугристом берегу ручья Светлый. Тип леса – сосняк брусничный. Состав 9С1Еед.Б, бонитет – IV, полнота – 0,7. Подрост – 9Е1С+Б (2,0 тыс. шт./га). В подлеске присутствуют рябина и можжевельник. В напочвенном покрове преобладают кустарнички (брусника, реже черника), лесное мелкотравье (седмичник, майник двулистный, дерен шведский, ожика волосистая, золотарник, голокучник трехраздельный, лерхенфельдия), зеленые листостебельные мхи. Почва слабоподзолистая, легкосуглинистая, на суглинке.

На каждом из опытных участков у 5–10 деревьев ели 1-го яруса, близких по таксационным показателям, с отсутствием фауности, механических повреждений, косо- и водослойности при помощи бурава Пресслера с южной стороны ствола на высоте груди брались керны для дендрохронологического анализа. Количество исследованных кернов – 48.

Измерение ширины годичных колец проводили под бинокулярным микроскопом МБС-10 при увеличении объектива в 4 раза и окуляра со шкалой микрометра – в 8 раз. Точность измерений – 0,05 мм. Статистический анализ результатов измерений основан на стандартных методиках [5] и выполнен с помощью программы Microsoft Excel 2007. Построены графики динамики радиальных приростов и изучена цикличность радиального роста ели как для каждого дерева, так и для каждого отдельного участка.

Результаты исследования и их обсуждение

Обобщенное описание радиального роста деревьев дано в табл. 1.

Изменчивость годичного радиального прироста у ели варьирует, по классификации С.А. Мамаева [9], от средней (2,9 % деревьев) до повышенной (22,8 %), высокой (45,7 %) и очень высокой (28,6 %). Линейная зависимость диаметра деревьев ели от возраста характеризуется слабой теснотой связи при низком коэффициенте детерминации ($R^2 = 0,27$), что объясняется неоднородностью условий местопроизрастания. На фоне общего линейного тренда снижения приростов при умеренной тесноте связи ($R^2 = 0,48$) прослеживаются несколько волн спада (от 90 до 130 лет и от 180 лет и более) и подъема (до 80 лет и от 140 до 170 лет) средних значений ширины годичного кольца. Деревья, произрастающие на разных участках, достигшие возраста 150–160 лет и более, показывают общую тенденцию снижения среднего абсолютного радиального прироста отдельно взятых растений.

Таблица 1

Общая характеристика исследованных образцов
General characteristics of the examined samples

Уча- сток	Условный возраст деревьев, лет		Средний диаметр ствола на высоте груди, см	Ширина годичного кольца, мм		Индивидуальная изменчивость радиаль- ных приростов, %	
	средний	диапазон		средняя	минимум– максимум	средняя	минимум– максимум
1	104	33–132	19,1	0,95	0,10–3,15	47,4	42,9–56,5
2	162	107–256	18,7	0,56	0,10–3,10	51,4	34,4–63,7
3	147	127–194	40,7	1,32	0,25–4,30	34,4	26,1–39,6
4	105	69–176	24,3	1,11	0,10–4,50	50,9	45,7–63,4
5	62	30–184	22,9	2,31	0,15–6,70	28,3	17,1–47,7
6	104	40–206	20,6	1,20	0,05–3,50	48,1	28,0–79,7

Сравнение средних радиальных приростов отдельных деревьев ели за указанные периоды в районе настоящих исследований выявило, что этот показатель варьирует в очень широком диапазоне (от 0,36 до 2,99 мм). На одних участках у всех деревьев в последние 10-летия наблюдалось его увеличение, а для других эта закономерность не выявлена. Около 42,86 % всех растений характеризовались повышением абсолютного радиального прироста в период 2000–2009 гг. и 51,43 % – в период 2010–2019 гг., причем для суходольных местопроизрастаний соотношение деревьев составило 50 и 60 % соответственно, для олиготрофных – 40 и 60 % соответственно, а для контрольного участка – 40 и 30 % соответственно.

Несколько отличные от наших данные получены Е.В. Лопатиным [8, 22]: в северной подзоне тайги Республики Коми отмечается увеличение среднего радиального прироста ели за период с 1951 по 2000 г. (0,75 мм) по сравнению с приростом за период с 1901 по 1950 г. (0,60 мм). Это, по мнению автора, связано с изменением климата. Близкие к нашим результаты получены для национального парка «Лосиный остров» [14], расположенного на территории Москвы и Московской области: средняя ширина годичного кольца у ели возрастом до 140 лет здесь была стабильной (около 1 см), а затем увеличилась до 1,5 см. Основным климатическим фактором, определившим такое увеличение, авторы [14] называют сумму осадков в мае–июле.

С целью нивелирования возрастного тренда проведено сглаживание дендрохронологических рядов, предлагаемое разными исследователями в размерности от 3–5 лет до 31 года [13]. Наряду с наиболее известным и простым способом получения средних значений радиальных приростов – 10-летнего индексирования дендрохронологических рядов – оправданы и более короткие периоды осреднения, позволяющие сохранить циклы, меньшие, чем период сглаживания. Более короткие интервалы осреднения дают более длинный дендрохронологический ряд. Методом 5-летнего скользящего сглаживания рассчитаны показатели нормы прироста для каждого дерева и получены графические изображения, показывающие ход осредненных за 5 лет значений прироста с шагом в 1 год (рис. 2). На разных участках у деревьев ели чаще всего наблюдалась разная длительность циклов депрессий и экспрессий (табл. 2). На одном и

том же участке динамика норм прироста у разных деревьев могла не совпадать или иметь схожую динамику проявления цикличности в отдельные периоды жизни деревьев.

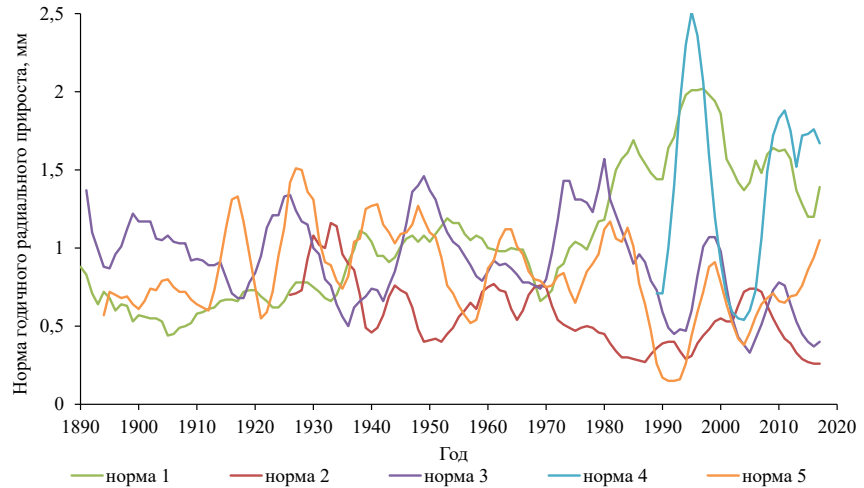


Рис. 2. Норма абсолютного годичного радиального прироста отдельных деревьев ели на участке 1 (пример)

Fig. 2. Rate of absolute annual radial growth of selected spruce trees at plot No. 1 (example)

Таблица 2

Цикличность радиального роста деревьев ели на опытных участках
Cyclicality of radial growth of spruce trees in experimental areas

Участок	Количество циклов		Среднее значение цикла	
	депрессий	экспрессий	депрессий	экспрессий
1	$\frac{7-163}{92}$	$\frac{5-357}{120}$	$\frac{17,4-46,8}{37,0}$	$\frac{12,8-61,0}{39,6}$
2	$\frac{84-244}{161}$	$\frac{88-233}{145}$	$\frac{34,3-77,4}{50,3}$	$\frac{36,3-69,5}{48,8}$
3	$\frac{77-184}{135}$	$\frac{23-190}{119}$	$\frac{35,3-58,0}{45,0}$	$\frac{14,6-69,0}{46,0}$
4	$\frac{19-245}{136}$	$\frac{28-259}{134}$	$\frac{24,0-54,6}{36,4}$	$\frac{15,8-48,0}{35,7}$
5	$\frac{1-496}{134}$	$\frac{6-424}{119}$	$\frac{11,0-56,3}{24,3}$	$\frac{9,7-59,7}{25,0}$
6	$\frac{4-201}{111}$	$\frac{6-157}{92}$	$\frac{14,8-42,8}{28,6}$	$\frac{19,3-45,9}{30,0}$

Примечание: В числителе – диапазон, в знаменателе – среднее значение.

Цикличность природных процессов связана с циклами солнечной активности [4]. Н.В. Ловелиус [7] обнаружил ее влияние на ширину годичного кольца хвойных на северной границе распространения лесов, причем чаще такая синхронность видна в 11-летнем цикле, иногда с запаздыванием на 2 года, с меньшей вероятностью проявляются 5–6- и 4-летние циклы.

На основе кривых норм прироста построены графические изображения повторяемости циклов разной длительности. Наиболее часто минимальные экстремумы отмечались вблизи значений общеизвестных циклов солнечной активности (11, 22, 33-летнего и векового) (рис. 3).

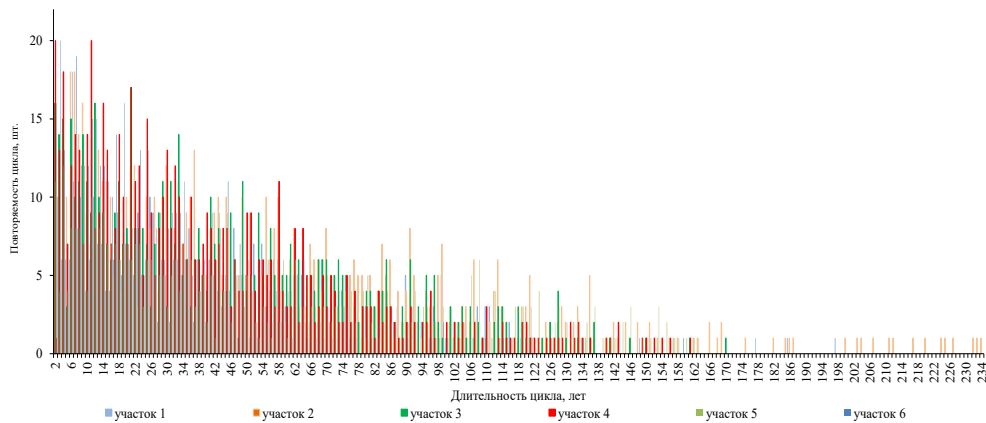


Рис. 3. Повторяемость циклов разной периодичности между минимумами нормы абсолютного годичного прироста деревьев ели (общее)

Fig. 3. Repeatability of cycles with diverse periodicity between the minima of absolute annual growth rate of spruce trees (in general)

Из циклов малой периодичности наиболее представлены 4- и 6–7-летний полуциклы. Из циклов, близких к магнитному (22-летний цикл Хейла), наиболее выражены 21- и 33-летний (Брикнеровский) циклы. Менее представлены 41, 43, 45, 49, 58 и 62-летние циклы. Высокая повторяемость 91, 99, 106 и 108-летних циклов свидетельствует о проявлении векового цикла солнечной активности (цикла Гляйсберга) продолжительностью около 70–100 лет. Отмечено проявление циклов 128, 133, 136 и 146 лет. Наблюдался и 2-вековой цикл Зюсса, когда 1 раз в 200 лет происходит устойчивое снижение солнечной активности, которое может продолжаться десятки лет.

Цикличность наступления максимумов радиального прироста (рис. 4) несколько отличается от циклов минимумов. Среди малых циклов наибольшую повторяемость имеют 4- и 6-летний полуциклы. Широко представлена цикличность 11- и 14-летней длительности, что соответствует солнечному циклу, или циклу Швабе (11 лет), а также 20–21-летней длительности (близкий к циклу Хейла, или магнитному – 22 года). О такой же циклической составляющей периодом 4–8 лет говорят П.А. Феклистов и В.М. Барзут для 50 % исследованных дендрохронологических рядов ели, отмечая как наиболее частые гармоники с периодом 12–16 лет [17]. В нашем случае ярко выражен Брикнеровский цикл (тройной солнечный), который отмечен с 30–31- и 35-летней циклическостью. Несколько реже представлены 55-, 64–65-летние (полувековые) и 87–90-, 99–100-летние (приближенные к вековому циклу солнечной активности) и еще реже – 122–124-летние циклы. Самые длительные хорошо обнаруживаемые циклы: 141–143, 154–158, 181, 199–200, 206, 217-летние, 3 последних соответствуют 2-вековому циклу. Наибольшую схожесть в совпадении длительности циклов экспрессий имели участки 2 и 4.

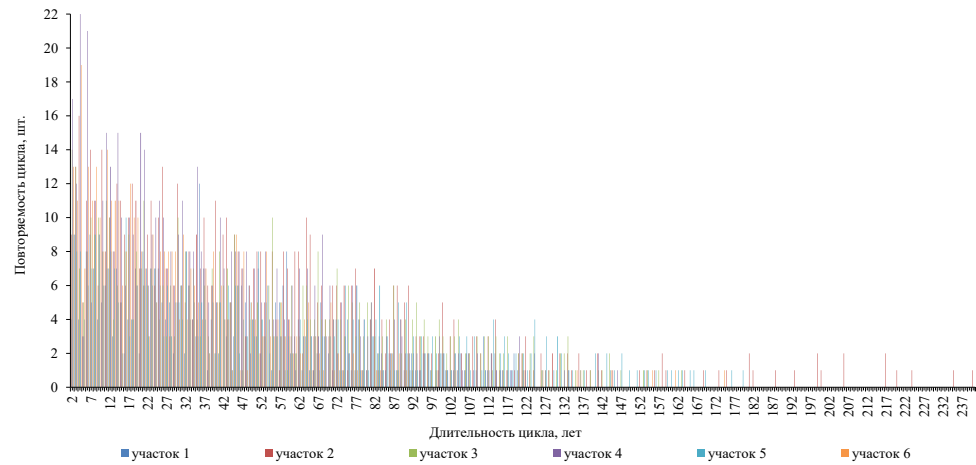


Рис. 4. Повторяемость циклов разной периодичности между максимумами нормы абсолютного годичного прироста деревьев ели (общее)

Fig. 4. Repeatability of cycles with diverse periodicity between the maxima of absolute annual growth rate of spruce trees (in general)

В целом, чем старше дерево, тем больше средняя продолжительность цикла как экспрессии, так и депрессии, при этом у одного и того же дерева показатели средней цикличности наступления минимумов и максимумов отличаются. Повторяемость периодов минимальных и максимальных экстремумов аппроксимируется полиномом 6-го порядка, коэффициенты детерминации составили соответственно 0,947 и 0,945 (рис. 5).

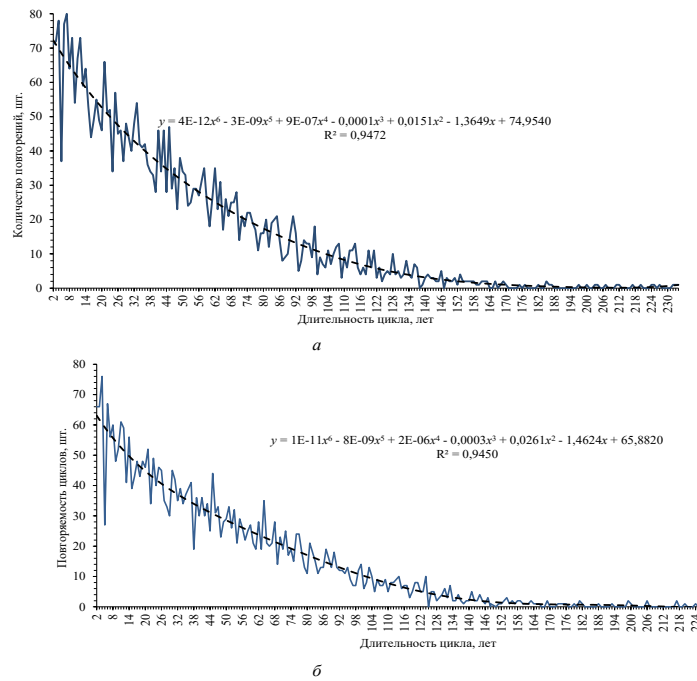


Рис. 5. Суммарная повторяемость циклов разной периодичности между минимумами (а) и максимумами (б) нормы абсолютного годичного прироста деревьев ели

Fig. 5. Total repeatability of cycles with diverse periodicity between (a) the minima and (b) the maxima of absolute annual growth rate of spruce trees

Динамика средних относительных индексов радиального прироста ели показана на рис. 6.

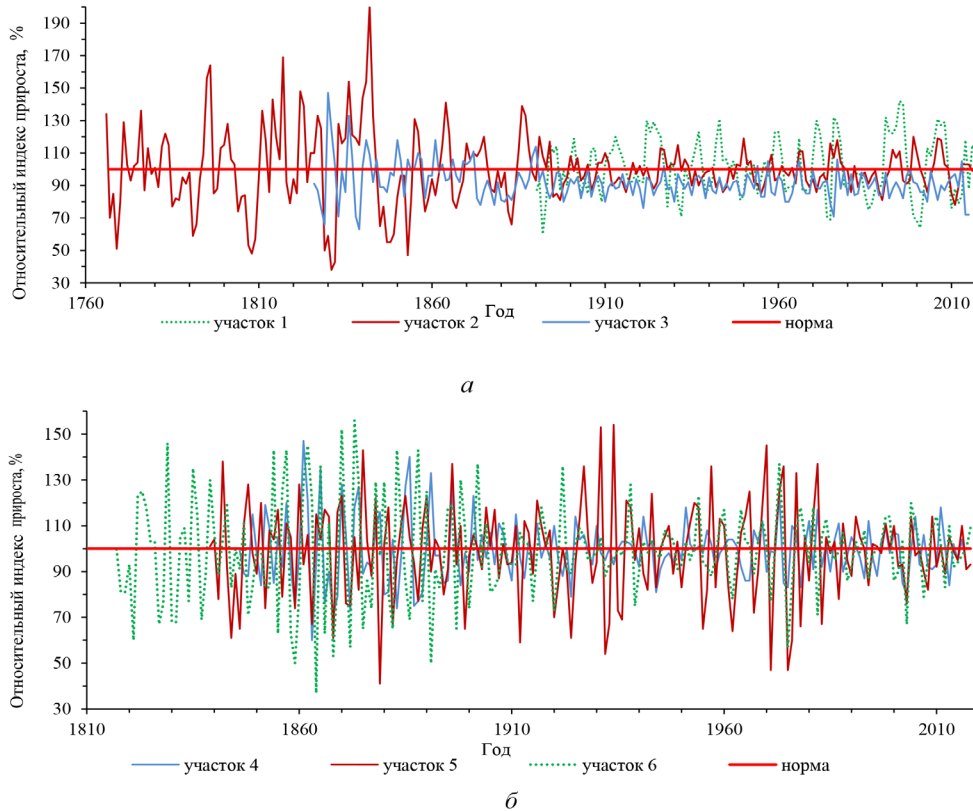


Рис. 6. Динамика средних относительных индексов годичного радиального прироста ели на участках: *а* – 1–3; *б* – 4–6

Fig. 6. Dynamics of average relative radial growth indices of spruce trees on the trail plots: *a* – 1–3; *b* – 4–6

Средние относительные индексы радиального прироста ели, рассчитанные по всем деревьям для каждого из 6 участков, и их повторяемость в различных диапазонах времени приведены в табл. 3.

В последние два 10-летия у деревьев на большинстве участков возросла повторяемость относительных индексов прироста ниже нормального значения (менее 100 %). Указанный период времени совпадает с началом горных работ на месторождении им. М.В. Ломоносова. Для всех участков (в том числе и для контрольного), за исключением участков 2 и 6, отмечается общее снижение величины максимальных приростов по отношению ко всему ряду наблюдений, а следовательно, и уменьшение амплитуды прироста. Участки 2 и 6 отличаются от других участков тем, что количество относительных индексов приростов больше и меньше нормы одинаково в течение 2000–2020 гг. Для деревьев ели на участках 2, 4 и 6 повторяемость относительных индексов радиального прироста со значениями выше и ниже нормы за весь период наблюдений с 2000 по 2020 г. была почти одинаковой. На участках 1, 3 и 5 за этот же период времени наблюдалось увеличение доли средних относительных индексов прироста ели, имеющих показатели ниже нормы.

Таблица 3

Средние относительные индексы радиального прироста за разные периоды времени для всего ряда наблюдений и за 2 последних 10-летия
Average relative radial growth indices over different time periods for the entire observation series in the last two decades

Период	Относительный индекс прироста, %			Повторяемость значений относительных индексов прироста, %		
	мини-мальный	макси-мальный	амплитуда	100	более 100	менее 100
<i>Участок 1 (128 лет)</i>						
Весь ряд	60	142	82	1,57	47,65	50,78
2000–2019	64	131	67	0	55,67	44,40
2010–2019	76	118	42	0	37,50	62,50
<i>Участок 2 (252 года)</i>						
Весь ряд	38	201	163	1,19	44,05	54,76
2000–2019	81	118	37	5,50	55,60	38,90
2010–2019	78	103	25	0	50,00	50,00
<i>Участок 3 (190 лет)</i>						
Весь ряд	63	147	84	1,05	15,79	83,16
2000–2019	72	105	33	0	6,25	93,75
2010–2019	72	105	33	0	16,70	83,30
<i>Участок 4 (172 года)</i>						
Весь ряд	60	147	87	1,74	44,19	54,07
2000–2019	80	118	38	0	44,40	55,60
2010–2019	84	118	34	0	50,00	50,00
<i>Участок 5 (180 лет)</i>						
Весь ряд	41	154	113	3,33	50,00	46,67
2000–2019	76	114	38	0	31,58	68,42
2010–2019	89	110	21	0	33,33	66,67
<i>Участок 6 (202 года)</i>						
Весь ряд	37	156	119	3,47	45,54	50,99
2000–2019	67	120	53	5,26	47,37	47,37
2010–2019	83	114	31	11,11	44,44	44,44

Примечание: Полужирным шрифтом выделены значения, имеющие большую повторяемость в указанных диапазонах.

Для более полного понимания динамики радиального прироста ели в течение последнего 20-летия показан фрагмент графиков средних относительных индексов прироста для каждого участка за 100-летний период – с 1920 по 2019 г. (рис. 7).

На всех участках наблюдалось уменьшение амплитуды прироста с 2000 по 2003 г., а затем, в еще большей степени, с 2010 по 2019 г. В последнее 10-летие участки 2 и 3 отличаются снижением относительных индексов прироста (в большинстве случаев они менее 100 %).

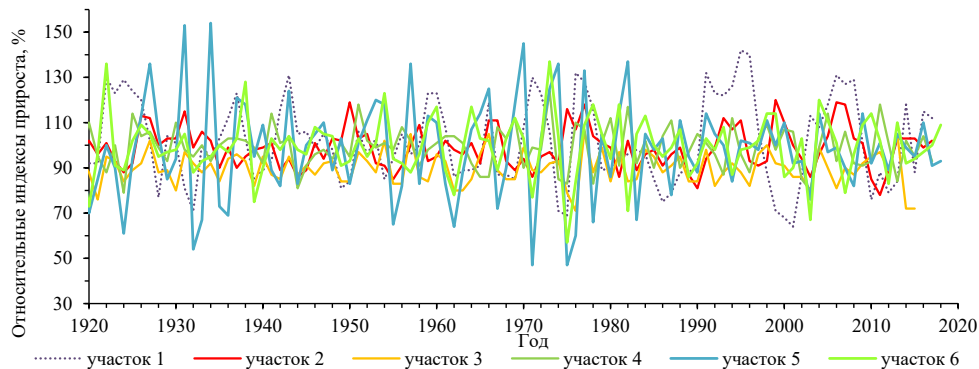


Рис. 7. Динамика средних относительных индексов годичного радиального прироста ели для всех участков за последние 100 лет

Fig. 7. Dynamics of average relative radial growth indices of spruce trees on the whole experimental area over the last 100 years

Радиальный прирост определяется множеством внешних факторов [11, 21, 23]. Учитывая это, целесообразно, кроме последствий техногенного воздействия, изучить влияние на радиальный рост ели в зоне горных разработок и других экологических факторов (температуры воздуха, количества осадков, высоты снежного покрова и пр.), что не предполагалось настоящим исследованием.

Выводы

1. Ширина годичных колец ели, произрастающей в экологических условиях, создаваемых горнодобывающей промышленностью, колеблется от 0,05 до 6,7 мм и отличается высокой изменчивостью, как индивидуальной, так и в пределах рассматриваемых участков, составляя диапазон средних приростов для отдельных деревьев в олиготрофных местообитаниях – 0,36–1,69 мм, в суходольных – 0,43–2,99 мм и на контроле – 0,82–1,77 мм.

2. В динамике радиального роста ели на всех опытных участках прослеживается цикличность: периоды минимальных приростов хорошо сопряжены с 11, 22, 33-летними и вековым солнечными циклами; для максимумов наиболее выражены 11, 14 и 20–21-летние циклы, что в целом также близко к солнечным циклам; среди экстремумов подъема и спада малой периодичности часты 4- и 6-летний полуциклы.

3. Большинство исследованных участков характеризуются спадом относительных индексов радиального прироста ели ниже нормального значения (показатели менее 100 %) в последние 10–20 лет. Изменение тренда радиального роста у ели в олиготрофных местообитаниях может быть вызвано формированием депрессионной воронки и общим понижением уровня грунтовых вод. Вместе с тем в местообитаниях с застойным избыточным увлажнением (постоянным или временным), расположенных на расстоянии до 8 км от карьера, у деревьев ели в последние 10–20 лет наблюдается увеличение, иногда довольно существенное, ширины годичных колец, что может быть связано с эффектом лесосушения.

4. Водоносные горизонты четвертичных отложений карстового района представляют собой единую гидродинамическую систему. Поэтому в отдаленной перспективе, после затопления карьеров, общее повышение уровня грунтовых вод приведет, вероятнее всего, к началу процессов заболачивания и постепенному изменению всего облика растительного покрова на прилегающей территории.

5. Влияние других значимых экологических факторов, кроме воздействия близко расположенного предприятия горнодобывающей промышленности, на радиальный рост ели в настоящей работе не учитывалось. Это может послужить предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова Е.Ю. Биоиндикационная оценка качества городской среды // Проблемы развития территории. 2015. Вып. 5(79). С. 170–178.

Aleksandrova E.Yu. Bioindicative Assessment of the Urban Environment Quality. *Problemy razvitiya territorii* = Problems of Territory's Development, 2015, no. 5(79), pp. 170–178. (In Russ.).

2. АО «Севералмаз»: офиц. сайт. Режим доступа: <http://www.severalmaz.ru/> (дата обращения: 22.01.2022).

JSC Severalmaz. Official website: <http://www.severalmaz.ru/>

3. Атлас Архангельской области. М.: ГУГК, 1976. 72 с.

Atlas of the Arkhangelsk Region. Moscow, Glavnoye upravleniye geodezii i kartografii USSR Publ., 1976. 72 p. (In Russ.).

4. Дергачев В.А., Распопов О.М. Долговременные процессы на Солнце, определяющие тенденцию изменения солнечного излучения и поверхностной земной температуры // Геомагнетизм и аэронавигация. 2000. Т. 40, № 3. С. 9–14.

Dergachev V.A., Raspopov O.M. Long-Term Processes on the Sun That Determine Change in Tendency of Solar Radiation and Surface Temperature of Earth. *Geomagnetizm i aeronomiya* = Geomagnetism and Aeronomy, 2000, vol. 40, no. 3, pp. 9–14. (In Russ.).

5. Ивантер Э.В. Основы практической биометрии: Введение в статистический анализ биологических явлений. Петрозаводск: Карелия, 1979. 95 с.

Ivanter E.V. *Fundamentals of Practical Biometry: Introduction to Statistical Analysis of Biological Phenomena*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 1979. 95 p. (In Russ.).

6. Ларченко В.А., Степанов В.П., Минченко Г.В., Кечик И.А. Алмазность кимберлитов и родственных им пород Зимнего Берега // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. 2004. № 2. С. 134–147.

Larchenko V.A., Stepanov V.P., Minchenko G.V., Kechik I.A. Diamond Content of Kimberlites and Related Minerals of the Zimniy Bereg. *Vestnik of Voronezh State University, Series: Geology*, 2004, no. 2, pp. 134–147. (In Russ.).

7. Ловелиус Н.В. Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 232 с.

Lovelius N.V. *Variability in Tree Growth. Dendroindication of Natural Processes and Anthropogenic Impacts*. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).

8. Лопатин Е.В. Анализ динамики радиального прироста основных лесобразующих пород Республики Коми: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2010. 20 с.

Lopatin E.V. *Analysis of Radial Growth Dynamics of the Dominant Forest Forming Species in the Komi Republic*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2010. 20 p. (In Russ.).

9. Мамаев С.А. Уровни изменчивости анатомо-морфологических признаков сосны // Ботан. исслед. на Урале. Сер.: Зап. Свердлов. отд-ния Всесоюз. ботан. о-ва. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1970. Вып. 5. С. 50–67.

Mamayev S.A. Levels of Variability in Anatomical and Morphological Properties of Pine Trees. *Zapiski Sverdlovskogo otdeleniya Vsesoyuznogo botanicheskogo obshestva, Series: Botanicheskie issledovaniya na Urale*, Sverdlovsk, UNTs, AN USSR, 1970, vol. 5, pp. 50–67. (In Russ.).

10. Мацковский В.В. Климатический сигнал в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской территории России. М.: ГЕОС, 2013. 148 с.

Matskovskiy V.V. *Climate Signal in Width of Annual Rings of Conifers in Northern and Central European Russia*. Moscow, GEOS Publ., 2013. 148 p. (In Russ.).

11. Мусеев П.А., Григорьева А.В., Главацких К.В. Радиальный прирост ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) разного возраста на верхнем пределе ее произрастания в горах Южного Урала (на примере массива Ирмель) // Молодой ученый. 2016. № 11(115). С. 573–577.

Moiseyev P.A., Grigoryeva A.V., Glavatskikh K.V. Radial Growth of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) of Several Ages at the Upper Limit of Its Growth in the Mountains of the Southern Urals (Using the Iremel Mountain Range as an Example). *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 11(115), pp. 573–577. (In Russ.).

12. Попова Л.Ф. Химическое загрязнение урбоэкосистемы Архангельска: моногр. Архангельск: САФУ, 2014. 231 с.

Popova L.F. *Chemical Pollution of the Urban Ecosystem of Arkhangelsk: Monograph*. Arkhangelsk: NArFU Publ., 2014. 231 p. (In Russ.).

13. Румянцев Д.Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 109 с.

Rumyantsev D.E. *History and Methodology of Forestry Dendrochronology: Monograph*. Moscow, MSFU Publ., 2010. 109 p. (In Russ.).

14. Румянцев Д.Е., Киселева В.В., Воробьева Н.С. Динамика радиального прироста в ценопопуляции ели европейской из Алексеевской рощи Национального парка «Лосинный остров» // Междунар. науч.-исслед. журн. 2020. № 9 (99), ч. 1. С. 49–54.

Rumyantsev D.E., Kiseleva V.V., Vorobyeva N.S. Dynamics of Radial Growth in European Spruce Cenopopulation from Alekseevskaya Grove of National Park “Losiny Ostrov”. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*, 2020, vol. 9, no. 99, part 1, pp. 49–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.99.9.010>

15. Рунова Е.М., Аношкина Л.В., Гаврилин И.И. Некоторые особенности использования дендрохронологической оценки прироста *Pinus sylvestris* L. при проведении биоиндикационных исследований в урбанизированной среде северных территорий // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 5. С. 146–150.

Runova E.M., Anoshkina L.V., Gavrillin I.I. Some Peculiarities of Application of Dendrochronological Estimation of *Pinus sylvestris* L. at Conducting Bioindicative Researches in Urban Environment of Northern Territories. *Lesnoi vestnik = Forest Bulletin*, 2014, vol. 5, pp. 146–150. (In Russ.).

16. Туровцев В.Д., Краснов В.С. Биоиндикация. Тверь: ТвГУ, 2004. 260 с.

Turovtsev V.D., Krasnov V.S. *Bioindication*. Tver State University Publ., 2004. 260 p. (In Russ.).

17. Феклистов П.А., Барзут В.М. Цикличность радиального прироста сосны и ели на Европейском Севере // Экология и защита леса: Взаимодействие компонентов лесных экосистем: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1985. С. 24–28.

Feklistov P.A., Barzut V.M. Cyclicity of Radial Growth of Pine, and Spruce in the European North. *Ecology and Forest Protection: Interaction of Components of Forest Ecosystems*. Collection of articles. Leningrad, Lesotekhnicheskaya akademiya Publ., 1985, pp. 24–28. (In Russ.).

18. Шевелёва А.В., Шварцман Ю.Г. Проблемы экологической безопасности при разработке месторождения алмазов имени Ломоносова // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2012. № 2. С. 40–46.
- Sheveleva A.V., Shvartsman Yu.G. Problems of Ecological Safety at Development of Lomonosov Diamond Deposit. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University, Series: Natural Sciences*, 2012, no. 2, pp. 40–46. (In Russ.).
19. Шкиль И.Э., Поршнев А.И., Малов А.И. Изменение гидрогеологических условий при осушении карьеров южной группы трубок месторождения им. М.В. Ломоносова // Проблемы недропользования. 2016. № 3. С. 105–114.
- Shkil I.E., Porshnev A.I., Malov A.I. Hydro-Geo-Ecological Conditions Changing Under Pits Drainage of the Southern Group of Tubes in the M.V. Lomonosov Deposit. *Problemy ne-dropol'zovaniya* = Problems of Subsoil Use, Ekaterinburg, 2016, no. 3, pp. 105–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.03.105>
20. Юзмухаметов Р.Н. Из истории открытия месторождения алмазов имени Ломоносова // Вестн. Помор. ун-та. Сер.: Гуманитар. и соц. науки. 2010. № 3. С. 32–37.
- Yuzmukhametov R.N. On the History of Diamond Deposit Discovery Named After Lomonosov. *Vestnik Pomorskogo universiteta, Series: Humanitarian and Social Sciences*, 2010, no. 3, pp. 32–37. (In Russ.).
21. Alekseev A.S., Sharma S.K. Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 42–54. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-42-54>
22. Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Impact of Climate Change on Radial Growth of Siberian Spruce, and Scots Pine in North-Western Russia. *IForest: Biogeosciences and Forestry*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 13–21. <https://doi.org/10.3832/ifor0447-0010013>
23. Mäkinen H., Nöjd P., Kahle H.-P., Neumann U., Tveite B., Mielikainen K., Röhle H., Spiecker H. Radial Growth Variation of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across Latitudinal and Altitudinal Gradients in Central and Northern Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 171, no. 3, pp. 243–259. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00786-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00786-1)
24. Tree Ring. Online International Tree-Ring Data Bank. NOAA, National Centers for Environmental Information. Available at: www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring (assessed 05.03.2022).
25. Parzych A., Mochnecký S., Sobisz Z., Polláková N., Šimanský V. Needles and Bark of *Picea abies* (L.) H. Karst and *Picea omorika* (Pančić) Purk. as Bioindicators of Environmental Quality. *Folia Forestalia Polonica, Series A: Forestry*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 230–240. <https://doi.org/10.2478/ffp-2018-0024>
26. Rodriguez-Catón M., Villalba R., Srur A.M., Luckman B. Long-Term Trends in Radial Growth Associated with Nothofagus Pumilio Forest Decline in Patagonia: Integrating Local- into Regional-Scale Patterns. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 339, pp. 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.004>

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*232.318+631.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-73-87

Комплексное применение биостимуляторов при выращивании семян ели (*Picea obovata* L.)

А.А. Агеев^{1,2}, канд. с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [AAF-9306-2021](https://orcid.org/0000-0001-9440-7167),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-7167>

Ю.В. Салцевич^{1,2}, инж.-исследователь, аспирант;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8804-0060>

Л.В. Буряк^{1,2}, д-р с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [AAH-8087-2019](https://orcid.org/0000-0001-7475-2959),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7475-2959>

¹Центр лесной пирологии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизводства лесов (филиал ВНИИЛМ), ул. Крупской, д. 42, г. Красноярск, Россия, 660062; ageevaa@firescience.ru, salcevichyv@firescience.ru, buryaklv@firescience.ru

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037

Поступила в редакцию 18.03.21 / Одобрена после рецензирования 15.06.21 / Принята к печати 20.06.21

Аннотация. Представлены результат 5-летнего эксперимента по выращиванию посадочного материала ели сибирской с применением различных комплексов биостимуляторов и опыт использования полученного посадочного материала в искусственном лесовосстановлении. Биостимуляторы для проведения опыта подбирались исходя из анализа исследований других авторов. Выбор способа обработки семян и сеянцев ели сибирской и концентрация препаратов устанавливались согласно «Государственному каталогу пестицидов и агрохимикатов», а также рекомендациям от производителей биостимуляторов. Выявлено эффективное влияние биопрепаратов «Феровит» (0,1 %) и «Цитовит» (0,01 %) для предпосевной обработки семян ели сибирской и препаратов «Эпин-экстра» и «Гетероауксин» с концентрацией растворов 0,002 % для корневой обработки сеянцев. Установлено, что определенное последовательное применение биостимуляторов роста на разных этапах выращивания сеянцев способствует более интенсивному протеканию биохимических процессов внутри растения (увеличение хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов), корреляция с высотой и фитомассой надземной части при этом положительная. Применение комплекса стимуляторов в сочетании «Феровит»–«Гетероауксин» и «Цитовит»–«Эпин-экстра»–«Гетероауксин» позволило получить в 3-летний срок посадочный материал, отвечающий не только минимальным требованиям к высоте и диаметру стволика, но и положительно отличающийся другими качественными показателями, такими как соотношение надземной/подземной частей растения, одревесненность стволика. По истечении срока выращивания сеянцев посадочный материал ели сибирской, культивируемый по разработанной технологии, при соблюдении всех требований и нормативов был использован для создания опытного участка лесных культур. За основу создания лесных культур приняты стандартные рекомендации, а также технические характеристики машин и агрегатов лесничества, где происходила посадка сеянцев ели сибирской. По результатам инвентаризационных работ на конец первого года посадочный материал обеспечил высокий процент приживаемости в культурах – 98,7 %.

© Агеев А.А., Салцевич Ю.В., Буряк Л.В., 2023

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

Ключевые слова: ель сибирская, семена ели, сеянцы ели, саженцы ели, искусственное лесовосстановление, биостимуляторы, прирост, биомасса, хлорофилл, каротиноиды

Для цитирования: Агеев А.А., Салцевич Ю.В., Буряк Л.В. Комплексное применение биостимуляторов при выращивании сеянцев ели (*Picea obovata* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 73–87. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-73-87>

Original article

Integrated Application of Biostimulants in Cultivation of Siberian Spruce Seedlings (*Picea obovata* L.)

Aleksandr A. Ageev^{1,2}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; Researcher ID: [AAF-9306-2021](https://orcid.org/0000-0001-9440-7167), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-7167>

Yuliya V. Saltsevich^{1,2}, Research Engineer, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8804-0060>

Ludmila V. Buryak^{1,2}, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; Researcher ID: [AAH-8087-2019](https://orcid.org/0000-0001-7475-2959), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7475-2959>

¹Branch of All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry “Center of the Forest Pyrology”, ul. Krupskoy, 42, Krasnoyarsk, 660062, Russian Federation; ageevaa@firescience.ru, salcevichyv@firescience.ru, buryaklv@firescience.ru

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

Received on March 18, 2021 / Approved after reviewing on June 15, 2021 / Accepted on June 20, 2021

Abstract. The article presents the results of a 5-year experiment on the cultivation of Siberian spruce seedlings combined with integrated use of biostimulants. Additionally, it describes an experience in application of the acquired planting material to artificial reforestation. The analysis of scientific publications was used for type selection of the chemical substances. The treatment for the seeds and the seedlings of Siberian spruce and the concentration of the growth promoters were chosen according to the “State Catalog of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use on the Territory of the Russian Federation”. For this purpose, the recommendations from manufacturers were also taken into concern. It is revealed that Ferovit (0.1 %) and Cytovite (0.01 %) are effective as pre-sowing treatment of the Siberian spruce seeds. Epin-Extra and Heteroauxin with concentrations of 0.002 % give a positive effect on the root development of the seedlings. The experiments showed that a certain sequential use of biostimulants at different stages of the seedling’s cultivation contributes to more intensive biochemical processes inside the plants (an increase in chlorophyll a, b, and carotenoids) with a positive correlation between height and phytomas in aerial parts. The combinations of the biostimulants, such as Ferovit–Heteroauxin and Cytovite–Epin-Extra–Heteroauxin, have improved the plant material within three years. The seedlings satisfied the requirements for the trunk’s height and diameter. They also demonstrated higher quality parameters, such as the proportion between aerial part and root system of the plants, as well as woodiness of the trunks. At the end of the nursery period, the planting material of Siberian spruce, cultivated according to the developed technology with all the requirements and regulations, was used to create a trial plot of forest. The reforestation of the Siberian spruce seedlings was made based on the standard recommendations and technical characteristics for the forestry equipment. The inventory inspection at the end of the first year demonstrated 98.7 % capacity for survival of the experimental trees.



Keywords: Siberian spruce, seeds, seedlings, reforestation, biostimulants, growth rate, biomass, chlorophyll, carotenoids

For citation: Ageev A.A., Saltsevich Yu.V., Buryak L.V. Integrated Application of Biostimulants in Cultivation of Siberian Spruce Seedlings (*Picea obovata* L). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 73–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-73-87>

Введение

В длинной цепочке процесса искусственного лесовосстановления наиболее экономически затратной частью является выращивание посадочного материала. На протяжении всего срока выращивания необходимо обеспечить высокий уровень агротехники, что требует затрат значительных технических, трудовых и финансовых ресурсов. Правилами лесовосстановления установлены минимальные требования к качеству посадочного материала по высоте надземной части, диаметру стволика и сроку выращивания (приказ Минприроды России от 14 авг. 2019 г. № 546 «О внесении изменения в Правила лесовосстановления, состав проекта лесовосстановления, порядок разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений»).

Срок выращивания семян для лесокультурных целей зависит от биологических особенностей растений, природно-климатических условий, а также от технологического уровня их выращивания. Так, для семян ели сибирской установлен минимальный срок выращивания 3–4 года.

За несколько лет семена должны достигнуть определенных параметров – не менее 12 см по высоте надземной части и не менее 2 мм по диаметру стволика у корневой шейки. Кроме этих характеристик для оценки качества посадочного материала используют еще ряд важных признаков: соотношение надземной и подземной частей растения, одревесненность стволика, развитие вегетативных частей и т. д. Если семена будут отвечать всем необходимым качественным показателям, то применение такого посадочного материала при лесовосстановительных работах даст значительный хозяйственный эффект: лучшую приживаемость и высокую адаптивную способность семян к новым условиям – что в последующем отразится на индивидуальной динамике роста растения, а затем и насаждения в целом.

Поиск путей, за счет которых можно существенно ускорить получение качественного посадочного материала, крайне важная задача для производства и лесной науки. Современная агротехника выращивания посадочного материала вышла за пределы стандартного набора механических приемов и включает в себя использование новейших биологических методов и средств. В том числе широкое применение получили биостимуляторы роста. Их использование не ново и до настоящего времени здесь уже предложены различные способы. Но при этом незавершенным остается поиск оптимальных по своему эффекту средств для каждого конкретного случая: подбор препаратов для целевого вида растения, нахождение оптимальной концентрации стимуляторов роста с учетом фазы развития растений (семян).

Для оценки эффективности действия биостимуляторов на семена чаще всего используется метод оценки нескольких параметров (высоты и диаметра) у сформировавшихся растений. Но фиксация этих параметров не дает

понимания как общего внешнего эффекта, так и внутреннего эффекта на уровне биохимических и физиологических процессов, происходящих в растительном организме. Полноценно характеризовать влияние биостимуляторов на морфологические признаки растения можно через изучение биохимии и физиологии внутренних процессов в растительном организме – по первичному отклику на фактор.

Цель исследования – оценка особенностей формирования сеянцев ели сибирской под влиянием комплексного применения биостимуляторов в различные фазы развития растений, а также успешности применения такого посадочного материала при искусственном лесовосстановлении.

Объекты и методы исследования

Семена ели сибирской заготовлены в 2015 г. и, согласно приказу Федерального агентства лесного хозяйства от 08.10.2015 г. № 353 «Об установлении лесосеменного районирования», соответствуют району работ. Для проведения эксперимента использованы семена 1-го класса качества.

Первый этап работы заключался в оценке развития проростков из семян, обработанных растворами стимуляторов роста: «Феровит» концентрацией 0,1 %, «Цитовит» – 0,01 %, «Циркон» – 0,02 % – при экспозиции семян в растворах в течение 3 ч. Определение всхожести, энергии прорастания и развития проростков под воздействием стимуляторов проводили в контролируемых лабораторных условиях при относительно стабильном температурном режиме – 24 ± 2 °С – в соответствии с методикой ГОСТ 13056.6–97. В качестве контроля были взяты семена, замоченные в дистиллированной воде при том же температурном режиме с экспозицией 24 ч. Проращивание осуществляли в чашках Петри на смоченных дистиллированной водой кружках фильтровальной бумаги с раскладкой на них по 100 семян, в 4 повторностях каждого варианта. В процессе проращивания фильтровальные кружки смачивали водой. Учет проросших семян и фиксацию развития проростков проводили ежедневно в одно и то же время суток в течение 15 дн.

Вторым этапом работы стало выращивание сеянцев в открытом грунте в течение 4 лет с 2016 по 2020 г. на базе Учебно-опытного лесхоза Сибирского государственного университета науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва (г. Красноярск). Предпосевную подготовку семян осуществляли с применением названных биостимуляторов. Посев проводили по строкам, поперек насыпных гряд, чередуя по 15 строчек каждого варианта обработки стимуляторами и водой в контроле (рис. 1). Так как почвы дерново-карбонатные среднесуглинистые свежие, принята глубина заделки семян 1 см при норме расхода 1 г/пог. м. За основу взяли стандартную агротехнику выращивания сеянцев ели сибирской, включающую ежегодные мероприятия по весеннему мульчированию посевов, временной установке щитов, регулярному поливу, прополке сорняков по мере их появления и 2-кратному рыхлению между строк [3]. После появления всходов проводили их корневую обработку препаратами «Эпин-экстра» и «Гетероауксин» с концентрацией раствора каждого стимулятора 0,002 %. На 2-й год выполняли повторную весеннюю корневую обработку сеянцев биопрепаратом «Гетероауксин» концентрацией 0,002 %.

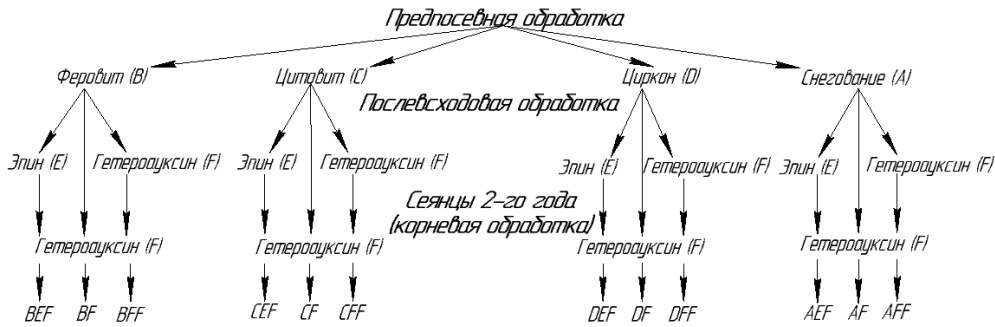


Рис. 1. Схема применения стимуляторов (буквенные обозначения, приведенные на рисунке, используются далее в тексте, на всех рисунках и в таблицах)

Fig. 1. Application scheme for biostimulants (the letters in the figure are used further in the text, the figures, and the tables)

Учетные работы по фиксации роста надземной части растений в посевах осуществляли систематически в каждом варианте опыта на 3 рандомизированных отрезках длиной по 30 см.

Абсолютную скорость роста (АСР) надземной части находили по формуле

$$АСР = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1},$$

где L_1, L_2 – высота надземной части сеянца в момент времени замера t_1, t_2 соответственно.

Для проведения измерений корневой системы и биомассы частей растений на протяжении 3 лет по завершении вегетационного периода выкапывали отрезок строки каждого варианта комом, содержащим не менее 30 сеянцев. Затем под проточной водой вымывали частички почвы и распутывали сплетения корней. Отделение надземной части растения от подземной выполняли по линии корневой шейки.

Морфометрические измерения вегетативных частей осуществляли от места разреза до верхней части апикальной меристемы центрального побега и до калиптры основного корня. Для определения сухой массы побегов и корней вегетативные части растений высушивали при температуре 80 °С [16, 18]. Измерение массы надземной части проводили для каждого сеянца, корневую массу устанавливали как среднеарифметическое значение для каждого варианта.

С целью выявления влияния комплекса биопрепаратов на фотосинтетический аппарат у 2-летних сеянцев было изучено спектрофотометрическим методом содержание в хвое хлорофилла a , хлорофилла b и каротиноидов [5]. Измерение оптической плотности проводили на спектрофотометре (ПЭ-5400УФ, Санкт-Петербург, Россия, ООО «Экротим») в соответствии с методикой А.А. Шлыка [11]. Опыт выполняли в 3 повторностях. В контрольную кюветку наливали 3 мл чистого спирта, в другие – по 3 мл спирта и по 0,4 мл раствора вытяжки. Оптическую плотность растворов измеряли при разных длинах волн: для хлорофилла a – при 662 нм, для хлорофилла b – при 645 нм, для каротиноидов – при 440,5 нм.

Концентрации пигментов, мг/л, в листьях определяли по формулам:

$$\begin{aligned} C_a &= 9,784D_{662} - 0,990D_{645}; \\ C_b &= 21,426D_{645} - 4,650D_{662}; \\ C_{\text{кар}} &= 4,695D_{440,5} - 0,268(C_a + C_b), \end{aligned}$$

где C_a и C_b – концентрация хлорофилла a и b соответственно, мг/л; D_{662} , D_{645} , $D_{440,5}$ – оптическая плотность спиртового раствора при соответствующих длинах волн (662, 645 и 440,5 нм).

Содержание пигментов в листьях, мг/г сырого веса,

$$X = \frac{CV}{1000M},$$

где C – концентрация пигмента, мг/1000 мл; V – объем исходной вытяжки, мл; M – масса навески, г.

Для оценки достоверности различий между выборками и выявления зависимости между биометрическими и морфометрическими показателями семян в тех случаях, когда выборки подчиняются нормальному распределению, использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Если выборки не подчинялись нормальному распределению – метод непараметрической статистики (критерий Краскела–Уоллиса). Для корреляционного исследования переменных применяли коэффициент ранговой корреляции r Спирмена. Расчеты проводили в программе Statistica.

Выращенный посадочный материал был использован при создании опытного участка лесных культур весной 2020 г. в низкогорной части Алтае-Саянского горно-таежного лесного района по стандартным рекомендациям А.И. Новосельцевой и Н.А. Смирновой [6] чистыми рядами по всем опытным вариантам с расстоянием между рядами 3 м и шагом посадки 0,7 м. Площадь опытного участка – 2,5 га. Инвентаризацию посадок проводили в соответствии с приказом Минприроды России от 14 авг. 2019 г. № 546 «О внесении изменения в Правила лесовосстановления, состав проекта лесовосстановления, порядок разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений».

При выборе биостимуляторов предполагалось, что вследствие последовательного применения нескольких препаратов можно не только стимулировать рост растения, но и снизить влияние стрессовых факторов и тем самым, возможно, достигнуть эффекта синергизма 2 препаратов, ускорив процесс выхода семян из покоя и вступление всходов в фазу интенсивного роста. Необходимость этого обусловлена тем, что всходы и молодые растения ели сибирской чувствительны к поздним весенним заморозкам, из-за чего посев осуществляют только после установления положительного суточного температурного режима воздуха. По причине заморозков у семян отмечается повреждение апикальной меристемы центрального побега, это ведет к приостановке роста и впоследствии может развиваться многовершинность. Из-за частых поздневесенних заморозков в ряде лесных районов Сибири период вегетационного оптимума роста ели сибирской часто оказывается недостаточен для полноценного сезонного развития, что обуславливает потерю прироста и, соответственно, увеличение срока выращивания посадочного материала.

В качестве стимуляторов при прорастании семян чаще всего используют препараты на основе растительных гормонов [15, 17] или их синтезированные аналоги (гибберелловые кислоты, цитокинины), а также фенольные соединения

[7, 10], витамины [12], микроэлементы [13, 14] и т. д. Сочетание стимуляторов роста [4, 17] и их применение в определенную фазу развития растения [9, 19, 20] играют крайне важную роль. Также необходимо избежать антагонизма препаратов, и, как следствие, возможного обратного эффекта от их использования. По этой причине при выборе исключали препараты одной группы происхождения.

Для исследования брали препараты, которые по своему назначению должны обеспечить высокую всхожесть и увеличить устойчивость появившихся всходов к резким перепадам суточных температур воздуха. После анализа литературных источников были выбраны следующие препараты для обработки семян: «Циркон», негормональный препарат на основе гидроксикоричных кислот [1], «Цитовит» и «Феровит», в основе которых хелатные микроудобрения [2, 8]. Для послевсходовой обработки с целью повышения устойчивости к резким колебаниям суточных температур в начале лета и стимулирования ростовых процессов применяли синтезированный брассиностероид «Эпин-экстра», а для стимулирования роста подземной и надземной частей растений – синтетический ауксин на основе индолилуксусной кислоты (ИУК). На 2-й год выращивания был использован также «Гетероауксин».

Результаты исследования и их обсуждение

Проращивание семян. Проращивание семян в контролируемых условиях не выявило существенных расхождений во всхожести и энергии прорастания между вариантами опыта (рис. 2). В 9-дневный период всхожесть всех заложенных на проращивание семян достигла 100 %, с наибольшей долей проросших на 4–5-е сутки. Можно предположить, что такие высокие показатели проращивания указывают на свежесть семян, их правильную обработку и хранение.

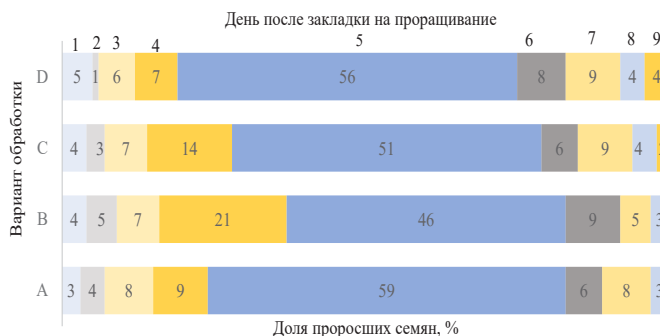


Рис. 2. Проращивание семян в контролируемых условиях

Fig. 2. Seed germination rate under controlled environment (A – water; B – Ferovite; C – Cytovite; D – Zircon)

В последующие 2 недели проведены наблюдения за развитием зародыша и формированием проростка (рис. 3). Этот период разделен на 2 фазы: I – растяжение покоящихся клеток зародышевой оси за счет поглощения воды (6–7-е сутки); II – начало клеточного деления, общее возрастание метаболизма семян. Во II фазу развития начинают проявляться различия между вариантами подготовки семян. Семена, обработанные препаратами «Феровит» и «Цитовит»,

на 14-й день сформировали хорошо развитые проростки, значительно отличающиеся от контроля ($p < 0,05$). Вариант, обработанный препаратом «Циркон», имел обратный эффект: произошло ингибирование ростовых процессов в зародыше, что, вероятнее всего, связано с высокой концентрацией примененного раствора, вызвавшего снижение синтеза ауксинов.

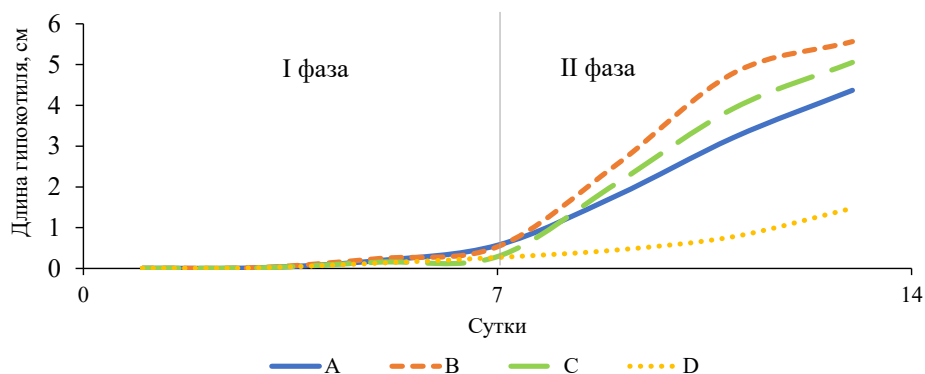


Рис. 3. Кинетика ростовых процессов зародыша и проростка

Fig. 3. Kinetics of growth processes of sprouts and seedling (A – water; B – Ferovite; C – Cytovite; D – Zircon)

Выращивание посадочного материала. Лучший результат по энергии прорастания показали семена, обработанные препаратами «Феровит» и «Цитовит». Первые всходы в этих вариантах опыта наблюдались через 14 дней после посева, еще через 4 дня появление всходов приобрело массовый характер. В вариантах с водой и «Цирконом» запаздывание массовых всходов составило 2 и 4 дня соответственно. Окончание формирования гипокотильной части и вытягивание семядолей закончились через 14 дней после появления всходов. Далее в течение 20 дн., до конца июля, у всходов всех опытных вариантов наблюдался несущественный прирост в высоту, что в большей степени связано с этапами внутренней трансформации плюмулы и подготовки к росту эпикотыля. Второй период линейного роста у однолетних сеянцев пришелся на конец июля – середину августа. В последующие годы динамика сезонного роста центрального побега также характеризовалась двумя всплесками активности ростовых процессов: 1-й приходится на середину июня, а 2-й, более мощный, – на 2-ю половину июля – начало августа. Данная закономерность прослеживалась во всех опытных вариантах. На рис. 4 показаны 4 варианта опыта.

Содержание хлорофилла и каротиноидов оценивали по всем опытным вариантам выращивания у 4-летних сеянцев ели. Хвоя от сеянцев, выращенных с применением препарата «Феровит» (вариант BF), по содержанию хлорофилла и каротиноидов значительно отличается от хвои сеянцев, выращенных с применением других препаратов ($p < 0,05$). «Феровит» содержит железо в хелатной форме – важный микроэлемент для процесса фотосинтеза. В эпикотильной стадии развития при переходе к автотрофной форме питания включаются процессы фотоморфогенеза и в первых настоящих хвоинках начинает активно синтезироваться хлорофилл. В условиях открытой местности питомника происходит значительный приток солнечной энергии к сеянцам, что при высоком содержании хлорофилла в хвое способствует ускорению метаболизма растения, тем самым определяя интенсивность ростовых процессов.

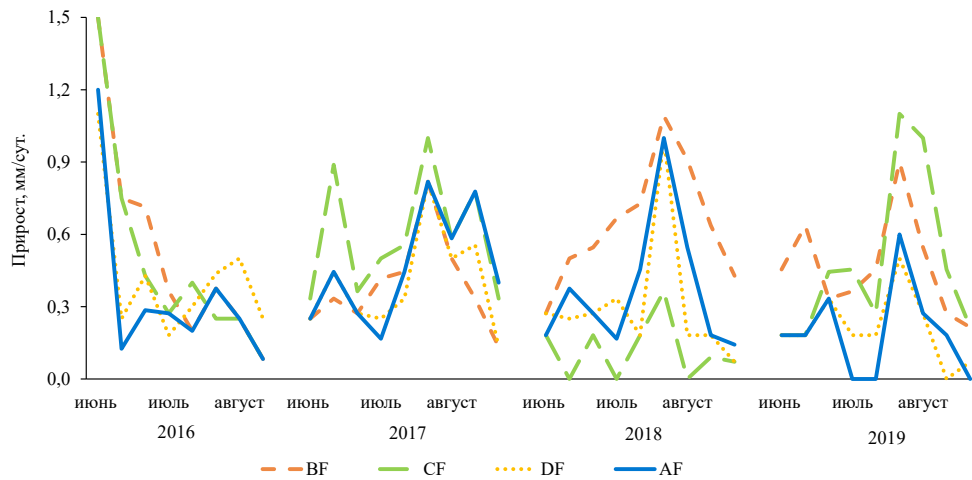


Рис. 4. Сезонный ритм роста осевого побега

Fig. 4. Seasonal growth rate of axial shoot

Хвоя сеянцев, семена которых были обработаны препаратом «Феровит», отличается по цвету от остальных вариантов более насыщенным оттенком зеленого. Каротиноиды выполняют в растении важную антиоксидатную роль, предохраняя хлорофилл от преждевременного разрушения (см. таблицу). Наблюдается значимая положительная зависимость между содержанием пигментов в хвое и морфометрическими показателями сеянцев в вариантах применения препарата «Феровит» ($r = 0,59$ при $p < 0,05$). Хвоя, взятая от сеянцев, выращенных из семян, подготовленных к посадке замачиванием в воде с последующей внекорневой обработкой «Гетероауксином» (AF), также отличается высокими показателями пигментного состава.

В литературе указывается, что достаточное количество света ограничивает рост растения в высоту, давая возможность всем вегетативным органам развиваться пропорционально. В наших исследованиях у сеянцев с высоким содержанием пигментов в хвое (варианты BF и BEF) наблюдается активное накопление надземной части фитомассы, при этом разница с корневой биомассой может быть значительна – в 3–4 раза (рис. 5).

Сеянцы, выращенные с применением препарата «Феровит», во всех вариантах дали наивысший результат по росту надземной части. Но также стоит обратить внимание на получившийся результат у сеянцев, выращенных с применением комбинации «Цитовит»–«Эпин-экстра»–«Гетероауксин» (вариант CEF). В этом варианте опыта по результатам 3-го года выращивания наблюдаются пропорционально развитые надземная и корневая части растений – соотношение 1:1 (рис. 6).

Однако не во всех случаях комплексное применение стимуляторов дает хороший результат. Примером здесь могут служить опытные варианты, показанные на рис. 6 по правую сторону от контрольного А. Возможно, что в тканях апикальной меристемы молодых растений концентрация ауксинов и так высокая, а внесение гормональных препаратов приводит к излишнему накоплению этих соединений или блокированию их синтеза, что в свою очередь со временем дает ингибирующий эффект.

Морфо- и биометрические показатели семян ели
Morphological and biometric indicators of the Siberian spruce seedlings

Вариант	Высота стволика		Длина корня		Масса, г		Хлорофилл <i>a</i>		Хлорофилл <i>b</i>		Каротиноиды	
	2019; ±Std.Dev, см	результат рангового дис- персионного анализа, сумма рангов	2018; ±Std.Dev, см	результат рангового дис- персионного анализа, сумма рангов	над- земной части	корня	±Std.Dev, мг/г	результат рангового дис- персионного анализа, сумма рангов	±Std.Dev, мг/г	результат рангового дис- персионного анализа, сумма рангов	±Std.Dev, мг/г	результат рангового дис- персионного анализа, сумма рангов
A	14,7±0,5	1785	9,9±0,5	3434	6,06	2,53	2,26±0,07	73	1,23±0,06	92	0,92±0,03	69
AEF	15,9±0,8	2572	10,8±0,7	3982	7,18	4,12	1,20±0,03	33	0,54±0,02	33	0,53±0,01	42
AF	15,6±0,9	1337	8,8±1,8	1547	8,47	2,61	2,25±0,04	74	0,97±0,01	60	0,98±0,02	78
AFF	15,6±0,5	2641	11,0±1,9	2520	7,02	2,97	2,56±0,03	96	1,05±0,01	69	1,12±0,01	87
BEF	17,5±0,6	4130	11,1±1,2	1241	3,84	1,55	3,99±0,01	105	1,82±0,01	114	1,99±0,00	105
BF	20,6±1,4	4997	11,4±1,9	4025	11,5	3,55	4,60±0,02	114	1,68±0,01	105	2,20±0,01	114
BFF	17,8±0,6	4224	10,7±1,9	3470	7,54	2,27	1,40±0,02	42	0,60±0,01	42	0,71±0,01	51
CEF	17,7±0,8	4125	11,3±2,3	4269	8,52	5,77	1,70±0,01	60	0,75±0,00	51	0,80±0,00	60
CF	16,4±0,9	3167	9,3±1,3	2569	4,63	2,29	1,53±0,02	51	1,22±0,00	91	0,47±0,01	24
CFF	14,1±1,2	1406	10,1±1,6	2300	4,55	2,13	2,49±0,01	87	1,09±0,00	78	1,19±0,00	96
DEF	15,1±1,5	2079	9,2±0,8	1519	6,22	1,89	1,12±0,02	24	0,50±0,01	24	0,51±0,01	33
DF	13,2±0,9	769	8,9±1,1	2215	5,00	1,54	0,41±0,01	6	0,17±0,00	6	0,21±0,00	6
DFF	13,0±0,9	694	11,5±1,1	836	3,41	1,27	0,78±0,02	15	0,34±0,01	15	0,35±0,01	15

Примечание: Результаты рангового дисперсионного анализа для всех показателей достоверны на уровне $p < 0,05$.

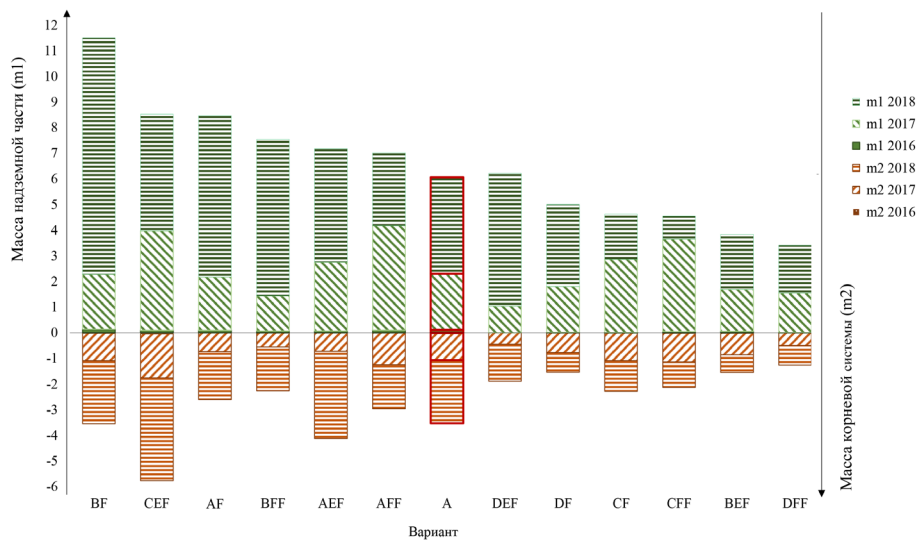


Рис. 5. Ежегодный прирост фитомассы подземной и надземной частей 3-летних сеянцев ели сибирской, г сухого вещества

Fig. 5. Annual phytomass growth of aerial part and root system of 3-year-old Siberian spruce seedlings, in g of a.d.m

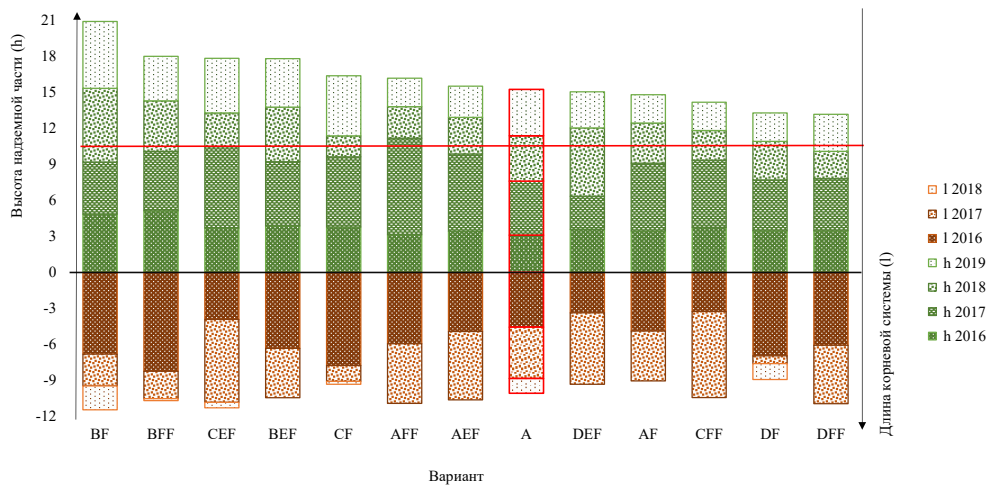


Рис. 6. Динамика ежегодного линейного прироста 3-летних сеянцев ели сибирской, см (горизонтальная красная линия – минимальные требования к высоте посадочного материала)

Fig. 6. Dynamics of annual linear growth of 3-year-old Siberian spruce seedlings, in cm (the horizontal red line shows minimum required height of the planting material)

Создание лесных культур. Выращенный посадочный материал был использован при создании лесных культур. Осенью в год закладки проведена инвентаризация посадок. Приживаемость посадочного материала составила 98,7 %. Большинство высаженных сеянцев успешно адаптировались к новым условиям и дали прирост в первый год выращивания (рис. 7).

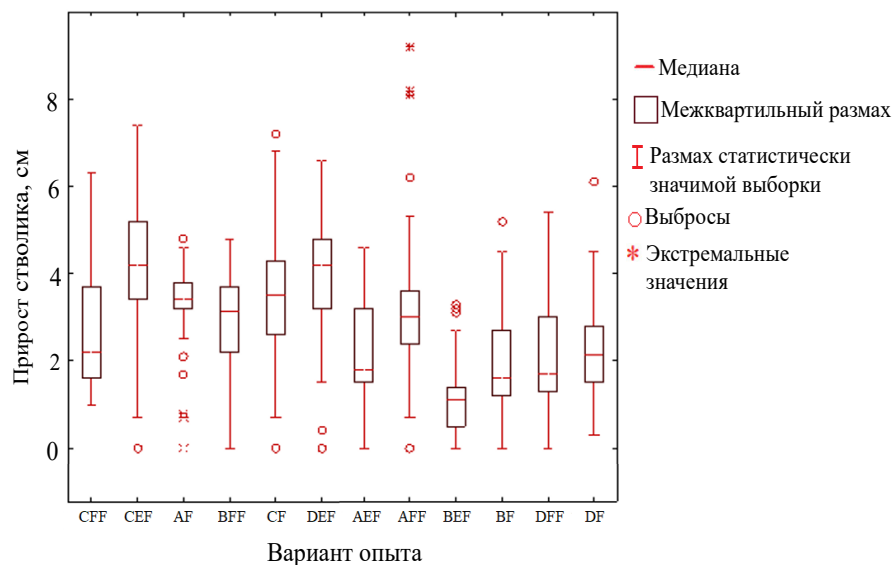


Рис. 7. Текущий прирост опытных лесных культур

Fig. 7. Current growth of the investigational forest crops

Наиболее высоким медианным текущим линейным приростом обладают варианты CEF (4,2 см), DEF (4,0 см), где 50 % измеренных приростов находятся в пределах от 3 до 5 см. Наименьший прирост сформировали сеянцы варианта BEF (медианное значение ≈ 1 см). Результаты 1-го года не позволяют формулировать объективные выводы об успешном применении посадочного материала, выращенного с использованием биостимуляторов. В дальнейшем планируются ежегодные наблюдения за ростом и состоянием опытных посадок, а также за изменениями биохимических процессов, протекающих в растениях.

Заключение

Проведенное исследование показало, что выбор стимуляторов роста, их доза и сроки применения в различные фенофазы развития семян должны подбираться с учетом биологических особенностей вида растения.

Эффект от использования стимуляторов «Феровит» (0,1 %) и «Цитовит» (0,01 %) для предпосевной обработки семян ели сибирской проявляется на стадии формирования проростка, не оказывая значимого влияния на всхожесть и энергию прорастания семян. В хвое сеянцев ели сибирской, выращенных из семян, обработанных препаратом «Феровит» в концентрации 0,1 %, наблюдается высокое содержание хлорофиллов и каротиноидов, участвующих в процессе фотосинтеза, что положительно коррелирует с высотой и фитомассой надземной части.

Применение комплекса стимуляторов в сочетании «Феровит»–«Гетероауксин» и «Цитовит»–«Эпин-экстра»–«Гетероауксин» позволило получить на третий год посадочный материал, отвечающий не только минимальным требованиям к высоте и диаметру стволика, но и положительно отличающийся другими качественными показателями, такими как соотношение надземной/подземной частей растения, одревесненность стволика.

Варианты обработок «Циркон»–«Гетероауксин» и «Циркон»–«Гетероауксин»–«Гетероауксин» не показали значимых результатов, наоборот – произошло ингибирование ростовых процессов у сеянцев, что, скорее всего, связано с высокой концентрацией препарата «Циркон» (0,02 %).

Изучение биохимии растительного организма позволит обоснованно применять биостимуляторы с учетом фазы роста растений и будет способствовать разработке качественно новых технологий выращивания посадочного материала в различных природно-климатических условиях. Посадочный материал ели сибирской, полученный по разработанной технологии, при соблюдении всех требований и нормативов по созданию лесных культур обеспечил высокий процент приживаемости – 98,7 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Байрамбеков Ш.Б., Мохамед С.М., Абакумова А.С. Влияние обработки регулятором роста «Циркон» на урожайность различных культур // *Естеств. науки*. 2009. № 4(29). С. 43–48.

Bayrambekov Sh.B., Mokhamed S.M., Abakumova A.S. Influence of Application Growth Regulator “Zircon” on Productivity of Various Cultures. *Estestvennyye nauki = Natural Sciences*, 2009, no. 4(29), pp. 43–48. (In Russ.).

2. Будыкина Н.П., Алексеева Т.Ф., Хилков Н.И. Эффективность фиторегулятора эпин экстра и микроэлементного препарата «Цитовит» в защищенном грунте // *Агротех. вестн.* 2010. № 2. С. 27–29.

Budykina N.P., Alekseyeva T.F., Khilkov N.I. Effectiveness of the Phyto regulator Epin Extra and the Micronutrient Agent Citovit in Greenhouse Environment. *Agrokhimicheskiy vestnik = Agrochemical Herald*, 2010, no. 2, pp. 27–29. (In Russ.).

3. Журнова Д.Ф. Применение биостимуляторов для повышения качества зеленой массы листового салата // *Вестн. КрасГАУ*. 2014. № 4. С. 166–170.

Zhirnova D.F. The Bio-Stimulator Application for Improving the Quality of Lettuce Green Mass. *Vestnik of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2014, no. 4, pp. 166–170. (In Russ.).

4. Кабанова С.А., Данченко А.М., Данченко М.А. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной в Северном Казахстане // *Успехи соврем. естествознания*. 2016. № 8. С. 88–92.

Kabanova S.A., Danchenko A.M., Danchenko M.A. The Effect of Growth Stimulators on the Quantitative Characteristics of Planting Material of *Pinus sylvestris* in the North-Kazakhstan Region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, no. 8, pp. 88–92. (In Russ.).

5. Кахнович Л.В. Фотосинтез: метод. рекомендации к лаб. занятиям, задания для самостоят. работы и контроля знаний студентов. Минск: БелГУ, 2003. 88 с.

Kakhnovich L.V. *Photosynthesis: Methodological Recommendations for Laboratory Classes, Tasks for Independent Work and Control of Students' Knowledge*. Minsk, Belgorod State National Research University Publ., 2003. 88 p. (In Russ.).

6. Новосельцева А.И., Смирнов Н.А. Справочник по лесным питомникам. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 280 с.

Novoseltseva A.I., Smirnov N.A. *Handbook of Forest Nurseries*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 280 p. (In Russ.).

7. Прусакова Л.Д., Кефели В.И., Белопухов С.Л., Вакуленко В.В., Кузнецова С.А. Роль фенольных соединений в растениях // *Агрохимия*. 2008. № 7. С. 86–96.

Prusakova L.D., Kefeli V.I., Belopukhov S.L., Vakulenko V.V., Kuznetsova S.A. The Role of Phenolic Compounds in Plants. *Agrokhiimiya*, 2008, no 7, pp. 86–96. (In Russ.).

8. Пушкина Г.П., Маланкина Е.Л., Тхаганов Р.Р., Морозов А.И. Эффективность применения регуляторов роста и микроудобрений на эфирномасличных культурах // Достижения науки и техники АПК. 2010. № 7. С. 17–19.

Pushkina G.P., Malankina E.L., Tkhananov R.R., Morozov A.I. Effectiveness of Growth Regulators and Microfertilizers Application on Essential-Oil Crops. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 2010, no. 7, pp. 17–19. (In Russ.).

9. Скозарева И.А., Чернодубов А.И. Эффективность применения стимуляторов роста при выращивании сеянцев сосны обыкновенной // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 3(35). С. 87–95.

Skozareva I.A., Chernodubov A.I. The Effectiveness of the Use of Growth Stimulants in the Cultivation of Seedlings of Scots Pine. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2019, vol. 9., no. 3(35), pp. 87–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.3/8>

10. Упадышев М.Т. Ускоренное размножение плодовых и ягодных культур стеблевыми черенками с использованием циркона // Современное садоводство. 2010. № 1(1). С. 49–52.

Upadyshev M.T. The Accelerated Propagation of Fruit and Berry Cultures by Stem Cuttings with Zircon Use. *Sovremennoye sadovodstvo = Contemporary Horticulture*, 2010, no. 1(1), pp. 49–52. (In Russ.).

11. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений / отв. ред. О.А. Павлинова, М.: Наука, 1971. С. 154–170.

Shlyk A.A. *Biochemical Methods in Plant Physiology*. Ed. by O.A. Pavlinova. Moscow, Nauka Publ., 1971. pp. 154–170. (In Russ.).

12. Fitzpatrick T.B., Chapman L.M. The Importance of Thiamine (Vitamin B1) in Plant Health: From Crop Yield to Biofortification. *Journal of Biological Chemistry*, 2020, vol. 295, no. 34, pp. 12002–12013. <https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.010918>

13. Ghatas Y., Ali M., Elsadek M., Mohamed Y. Enhancing Growth, Productivity and Artemisinin Content of *Artemisia annua* L. Plant Using Seaweed Extract and Micronutrients. *Industrial Crops and Products*, 2021, vol. 161, no. 113202, pp. 113–202. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113202>

14. He H., Dong Z., Peng Q., Wang X., Fan C., Zhang X. Impacts of Coal Fly Ash on Plant Growth and Accumulation of Essential Nutrients and Trace Elements by Alfalfa (*Medicago sativa*) Grown in a Loessial Soil. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 197, pp. 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.028>

15. Khan S., Basra S.M.A., Nawaz M., Hussain I., Foidl N. Combined Application of Moringa Leaf Extract and Chemical Growth-Promoters Enhances the Plant Growth and Productivity of Wheat Crop (*Triticum aestivum* L.). *Suid-Afrikaanse Tydskrif Vir Plantkunde = South African Journal of Botany*, 2020, vol. 129, pp. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.01.007>

16. Medeiros C.D., Scoffoni C., John G.P., Bartlett M.K., Inman-Narahari F., Ostertag R., Cordell S., Giardina C., Sack L. An Extensive Suite of Functional Traits Distinguishes Hawaiian Wet and Dry Forests and Enables Prediction of Species Vital Rates. *Functional Ecology*, 2019, vol. 33, no. 4, pp. 712–734. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13229>

17. Mitra D., Rad K.V., Chaudhary P., Ruparelia J., Boutaj H., Mohapatra P.D., Panneerselvam P. Involvement of Strigolactone Hormone in Root Development, Influence, and Interaction with Mycorrhizal Fungi in Plant: Mini-Review. *Current Research in Microbial Sciences*, 2021, vol. 2, no. 100026, p. 100026. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100026>

18. Nurafifah F., Luqman Chuah A., Puteri Farah Wahida M.A. Drying of *Plectranthus amboinicus* (Lour) Spreng Leaves by Using Oven Dryer. *Engineering in Agriculture Environment and Food*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.08.002>

19. Olaetxea M., De Hita D., Garcia C.A., Fuentes M., Baigorri R., Mora V., Garnica M., Urrutia O., Erro J., Zamarreño A.M., Berbara R.L., Garcia-Mina J.M. Hypothetical Framework Integrating the Main Mechanisms Involved in the Promoting Action of Rhizospheric Humic Substances on Plant Root- and Shoot-Growth. *Applied Soil Ecology: A Section of Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, vol. 123, pp. 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.007>

20. Shi W., Grossnickle S.C., Li G., Su S., Liu Y. Fertilization and Irrigation Regimes Influence on Seedling Attributes and Field Performance of *Pinus tabulaeformis* Carr. *Forestry*, England, London, 2019, vol. 92, no. 1, pp. 97–107. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035>

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*308
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-88-105

Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ

П.Б. Рябухин¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAK-3906-2021](https://orcid.org/0000-0003-1735-1942),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

О.А. Куницкая², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

О.И. Григорьева³, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

¹Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136, г. Хабаровск, Россия, 680042; 000340@pnu.edu.ru


²Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; ola.ola07@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; grigoreva_o@list.ru

Поступила в редакцию 25.12.21 / Одобрена после рецензирования 27.03.22 / Принята к печати 01.04.22

Аннотация. Работа посвящена анализу лесных сырьевых ресурсов Дальневосточного федерального округа, получены выводы, послужившие поводом для рассмотрения перспективной технологии и систем машин для лесозаготовок. Показана важность развития лесозаготовительного производства для рационального освоения лесных ресурсов и экономического развития Дальневосточного федерального округа. Выполнен анализ различных технологических процессов заготовки древесины. Предложена математическая модель для оценки деятельности лесопромышленных предприятий по параметру их экономической эффективности с учетом задач, поставленных Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Проведенное исследование лесных ресурсов региона показывает, что на сегодняшний день в хвойных насаждениях можно заготавливать до 60 % деловой древесины из всего объема, отпущенного в рубку. При этом пиловочник 1–2 сортов составляет только 30–35 % от этого объема. В рамках выполненного исследования на разработанных лесосеках установлены территориально-технологические участки, на которых образуются и концентрируются лесосечные остатки, определены виды и объемы оставляемой на лесосеках древесины. Показано, что в год на территории лесосек и погрузочных пунктов оставляется до 40–50 % от объема отпущенной в рубку древесины в виде стволовой низкотоварной древесины и лесосечных остатков. Предложены системы машин и технологии осуществления процесса заготовки древесины в смешанных насаждениях с низким классом товарности, позволяющие повысить степень использования древесины, снизить риски от захламления и обеспечить в перспективе сырьем различные деревоперерабатывающие предприятия

© Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И., 2023

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

лесного кластера региона. Рассмотренная математическая модель по определению экономической эффективности и рентабельности реализации выбранного лесопромышленным предприятием технологического процесса лесозаготовок дает возможность принимать обоснованные решения по выполнению сортиментного плана предприятия.

Ключевые слова: лесозаготовка, лесные машины, низкотоварная древесина, лесное хозяйство, система машин, эффективность лесозаготовки, лесопользование, переработка древесины

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

Для цитирования: Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 88–105. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-88-105>

Original article

Substantiation of Technological Processes and Machinery Systems for Logging Operations

Pavel B. Ryabukhin¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAK-3906-2021](https://orcid.org/0000-0003-1735-1942),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Olga A. Kunitskaya², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Olga I. Grigoreva³, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

¹Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; 000340@pnu.edu.ru

²Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye shosse, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; ola.ola07@mail.ru

³Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; grigoreva_o@list.ru

Received on December 25, 2021 / Approved after reviewing on March 27, 2022 / Accepted on April 01, 2022

Abstract. The work analyses the forest raw material resources of the Far Eastern Federal District. Corresponding to the conclusions, it is made an evaluation of a promising technology and systems of machinery for logging. It shows the significance of logging development for the rational exploitation of forest resources and the economic progress of the Far Eastern Federal District. It is performed an analysis of different technological procedures for timber harvesting. The study gives a mathematical model for the evaluation of forestry companies by economic efficiency, regarding the resolution “The Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation Until 2030”. The examination of the region’s forest resources reveals that, currently, in coniferous forests, up to 60 % of industrial wood is available from the total volume of timber for harvesting. However, the sawlog of 1–2 classes contains only 30–35 % of this volume. Within the framework of the

research conducted in the developed cutting areas are established territorial-technological plots, in which logging residues are produced and collected. In these plots, the types and the volumes of the abandoned wood are determined. It is estimated that approximately 40–50 % of the annual volume of the timber released for logging is left as a trunk low-value timber and forest residues at cutting areas and loading points. The article gives a proposal for the automation systems and technologies for harvesting in mixed stands with low-valued wood class, which allow to increase the degree of usable wood, reduce risks from littering and provide in the future various regional forestry companies with raw materials. The represented mathematical model on determination of economic efficiency and cost-effectiveness of technological process allows to make rational decisions on the implementation of bucking program of forestry company.

Keywords: logging, forest machines, low-valued wood, forestry, machinery system, logging efficiency, forest exploitation, timber processing

Acknowledgments: The work was performed within the framework of the scientific school “ Innovative Developments in the Timber Industry and Forestry” of the Arctic State Agrotechnological University. The research was supported by the grant from the Russian Science Foundation No. 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

For citation: Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Substantiation of Technological Processes and Machinery Systems for Logging Operations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 88–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-88-105>

Введение

Стратегией развития лесного комплекса страны до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 № 312-р, особое внимание уделяется развитию глубокой (безотходной) переработки древесины, ее полному использованию с целью недопущения оставления мелкотоварной древесины и отходов на лесосеках для улучшения санитарной и пожарной безопасности в лесах. Предполагается активный переход от экстенсивной модели освоения лесов к интенсивной с обеспечением комплексного использования лесного сырья (включая низкокачественную древесину) за счет формирования лесопромышленных кластеров вокруг существующих и планируемых предприятий по переработке древесины и новых целлюлозно-бумажных комбинатов [4].

С учетом имеющихся ограничений по сырью наиболее вероятно, что данные кластеры в первую очередь начнут формироваться (до 2028 г.) на базе имеющихся целлюлозно-бумажных комбинатов Иркутской и Архангельской областей, а также в Красноярском и Хабаровском краях [4].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются таксационные характеристики лесов Дальневосточного федерального округа и динамика их изменения, современные и перспективные технологические процессы и системы машин для лесосечных работ. При подготовке статьи использовались методы статистики, технического и технологического анализа процессов лесозаготовки и систем машин для лесосечных работ.

Дальневосточный федеральный округ имеет наибольшую площадь лесов среди федеральных округов Российской Федерации. По данным государственного лесного реестра на 01.01.2020, общая площадь земель, на которых расположены леса, составляет 569 877,6 тыс. га, из них площадь, покрытая лесной растительностью, – 344 490,3 тыс. га (60 % общей площади лесных земель). Лесистость округа – 49,5 %.

Развитие лесной промышленности Дальневосточного федерального округа в последние годы положительно влияет на социально-экономическую сферу – в регионе создано более 24 тыс. рабочих мест, дополнительные ежегодные доходы бюджета составили свыше 4 млрд р.

Хабаровский край является наиболее привлекательным из всех регионов Дальневосточного федерального округа для строительства целлюлозно-бумажных комбинатов из-за богатой сырьевой базы и стратегической близости к Китаю – крупнейшему рынку целлюлозы в мире. Развитая логистическая инфраструктура, включающая Байкало-Амурскую, Транссибирскую магистрали, р. Амур и выходы в порты Японского моря, позволяет обеспечить эффективную доставку лесного сырья и отгрузку продукции. Крупнейшим планируемым проектом в крае является строительство целлюлозно-бумажного комбината мощностью 700 тыс. м³ на территории опережающего социально-экономического развития «Комсомольск» в г. Амурске, сохранившем внешнюю инфраструктуру закрытого в 1994 г. Амурского целлюлозно-картонного комбината.

В рамках реализации Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. в Дальневосточном федеральном округе планируется более активная реализация проектов по переработке древесины, что приведет к росту показателей производства готовой продукции по сравнению с текущим уровнем. Предполагается, что крупнейшие предприятия Дальневосточного федерального округа по механической обработке древесины будут консолидированы в единый лесопромышленный кластер, на долю которого придется более 40 % расчетной лесосеки региона и 70 % установленных мощностей по лесопереработке. Интеграция целлюлозно-бумажного комбината в лесопромышленный кластер позволит стабилизировать баланс сырья в регионе и увеличить добавленную стоимость на 1 м³ лесного фонда [15, 21]. После завершения интеграции и выхода производств на плановую мощность лесопромышленный кластер войдет в тройку крупнейших лесопромышленных компаний России.

В рамках реализации Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. правительством Хабаровского края разработаны основные направления развития лесного комплекса края на указанный период (государственная программа Хабаровского края «Развитие лесного хозяйства в Хабаровском крае»), отмечены нерациональное использование лесных ресурсов региона и отсутствие в нем современных промышленных мощностей по глубокой переработке древесной массы [4]. Разработанный инвестиционный проект «Создание и модернизация объектов лесной и лесоперерабатывающей инфраструктуры на базе компании ООО «Эколес» на 2019–2023 гг.» предполагает активное развитие технологий заготовки и глубокой переработки древесины, делает акцент на расширении ассортимента продукции из низкокачественной древесины и отходов переработки (НКДО) круглых лесоматериалов, организации дополнительных производств на основе принципов устойчивого лесопромышленного управления.

Исследование лесных ресурсов региона показало, что в последние годы промышленный потенциал лесов в Дальневосточном регионе существенно снизился [14]. Это, по нашему мнению, связано с интенсивным использованием сплошных рубок и последствиями крупномасштабных лесных пожаров. Запасы спелой и перестойной древесины темнохвойных пород за последние 20 лет сократились более чем на 20 %, при этом по лиственным породам деревьев наблюдается незначительный прирост. Снижению качества лесовосстановления способствует также негативное воздействие тяжелых лесных машин на почвогрунты лесосек, приводящее к их переуплотнению, колееобразованию, возникновению эрозионных процессов, особенно при разработке лесосек на склонах и в условиях вечной мерзлоты [3, 7, 8, 10, 18, 23].

Необходимо отметить, что леса в Дальневосточном федеральном округе имеют низкий уровень производительности, преобладают насаждения IV, V, Va классов бонитета (рис. 1). Таким образом, со временем спелые и перестойные древостои будут переходить в более низкий класс бонитета – Va и Vб, что еще больше снизит эффективность заготовок [16].

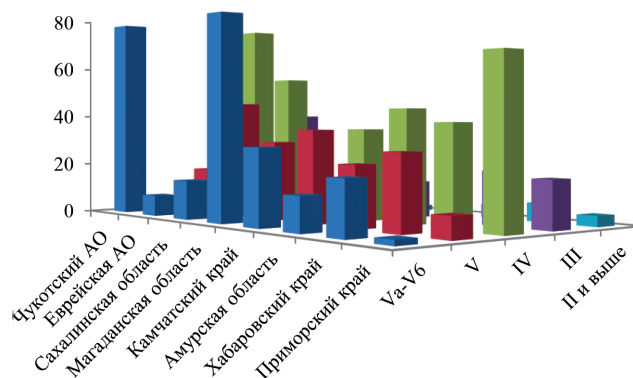


Рис. 1. Распределение площади хвойных насаждений в Дальневосточном федеральном округе по классам бонитета, тыс. га

Fig. 1. Distribution of coniferous plantings in the Far Eastern Federal District by stand's quality class, thousand ha

Пригодный для промышленной эксплуатации лесосечный фонд в регионе не превышает 40 % лесопокрытых земель, из них 25 % составляют леса с полнотой 0,4 и ниже, а 15–20 % насаждений произрастают на склонах крутизной более 30°, значительная часть лесных массивов находится на вечной мерзлоте [1, 19, 20]. Наблюдается увеличение площадей мягколиственных пород, формирующихся на местах вырубок хвойных лесов, пройденных пожарами. Площадь хвойных насаждений с полнотой 0,3–0,4 возросла на 10,2 %, а с полнотой 0,5–0,6 и 0,7–1,0 уменьшилась соответственно на 7,8 и 16,5 %, что указывает на сохранение по Дальневосточному региону устойчивой тенденции снижения доли лесных площадей, востребованных предприятиями лесопромышленного производства, – высокополнотных и продуктивных древостоев. Кроме того, в регионе наблюдается сокращение запасов эксплуатационной древесины на 1 га (рис. 2). Наиболее плачевная ситуация складывается в Магаданской области и Якутии [6], где запас на 1 га снизился на 45,2 и 31 % соответственно.

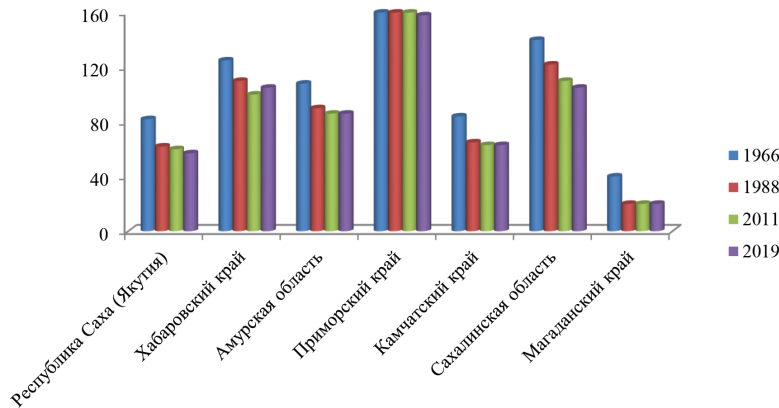


Рис. 2. Динамика распределения запаса всех древостоев на 1 га лесопокрываемых земель в Дальневосточном федеральном округе, м³

Fig. 2. Dynamics of distribution of the total stock of stands per 1 ha of forest covered land in the Far Eastern Federal District, m³

В других субъектах Дальневосточного федерального округа также происходит снижение запасов леса – в Амурской области на 18,5 %, в Хабаровском крае на 21 %, в Приморском крае на 9 %, в Сахалинской области на 22,5 %, в Камчатском крае на 23,4 %.

По результатам исследования установлено, что распределение основных эксплуатационных пород по возрасту также носит неблагоприятный характер – прирост запасов приспевающих насаждений значительно отстает по отношению к запасам молодняков и спелых (перестойных) древостоев (рис. 3). Запас и площади приспевающих древостоев по основным эксплуатационным породам во всех субъектах региона довольно низкие, чтобы в будущем достичь положительной дифференциации и заменить запасы спелых и перестойных насаждений.

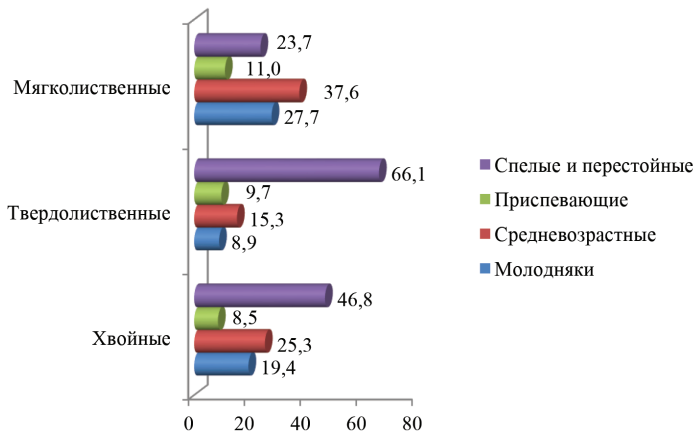


Рис. 3. Распределение запасов насаждений в Дальневосточном федеральном округе по классу возраста, %

Fig. 3. Dynamics of distribution of stands in the Far Eastern Federal District by age class, %

Тенденция уменьшения эксплуатационных запасов затрагивает практически все лесные формации Дальневосточного федерального округа. Для хвойных пород запас приспевающих насаждений составляет лишь 9,6 % для ели, 9,4 % для сосны и 10,4 % для лиственницы – это 9,7; 7,2 и 7,7 % от общей площади соответственно. Положительная динамика наблюдается для кедровых и пихтовых лесов, но преимущественно за счет запасов средневозрастных древостоев: у кедра 54,4 % и у пихты 40,4 %. Однако с учетом очень небольших территориальных эксплуатационных запасов это не меняет общую картину (рис. 4).

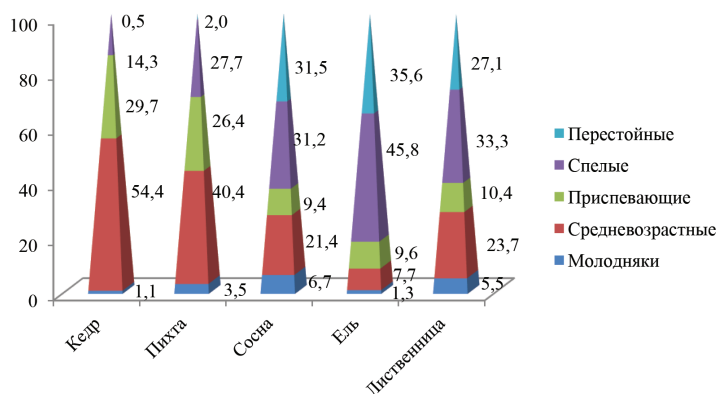


Рис. 4. Распределение запасов древесины хвойных пород в Дальневосточном федеральном округе по группам возраста, %

Fig. 4. Distribution of coniferous plantings in the Far Eastern Federal District by age group, %

Таким образом, можно предположить, что в ближайшей перспективе с учетом изменения климатической обстановки и негативного антропогенного воздействия на лесную среду лесопромышленная отрасль в Дальневосточном федеральном округе в целом и в Хабаровском крае в частности будет испытывать острый недостаток в сырье из древесины промышленного назначения. Наряду с отрицательной динамикой запасов древесины практически на всех лесозаготовительных предприятиях региона значительно выросли потери древесной массы на фазе лесосечных работ. К этой проблеме добавляются очень слабое развитие дорожной сети, недостаток качественных автомобильных дорог круглогодичного действия и сложности с перевозками по железной дороге [9, 29].

В связи с прогрессирующим истощением и снижением качества древесных ресурсов, понижением их природоохранного и экологического потенциала, возрастанием экологических требований актуальными становятся вопросы незамедлительного изменения стратегии лесопользования в регионе и перехода на ресурсосберегающие технологии лесозаготовок и переработки сырья, а также плантационного выращивания необходимых древесных ресурсов [2, 11].

В начальный период перехода экономики страны на рыночные отношения в Дальневосточном регионе практически полностью прекратили свое существование предприятия, осуществляющие переработку древесины.

В их числе крупные лесопильные заводы, фанерные комбинаты, предприятия по химической переработке древесины. Это привело к тому, что лесозаготовители стали вывозить с лесосек только высококачественную древесину в виде круглых лесоматериалов, пользующихся большим спросом на экспортном рынке, оставляя невостребованную низкотоварную древесину на лесосеках. С появлением высокопроизводительной процессорной техники большинство лесозаготовительных предприятий перешли от хлыстовой технологии заготовки древесины на сортиментную, что привело к значительному увеличению количества низкотоварной древесины и древесных остатков, захламляющих лесосеки. Необходимо отметить, что объем низкотоварной древесины, образующейся на всех фазах производства при хлыстовой и сортиментной заготовке древесины, примерно одинаков. Но места концентрации различны, и находятся они на разном расстоянии от производственных лесоперерабатывающих структур предприятия. Также отметим, что современные технологии и системы машин древесноподготовительных цехов, производящих технологическую щепу, способны эффективно выпускать этот необходимый полуфабрикат практически из любой древесины [24–26].

Пришло время, когда вопрос о необходимости принятия кардинальных мер, направленных на комплексное использование всей заготавливаемой древесной массы с целью получения продукции с добавленной стоимостью, становится не только актуальным, но и первостепенным. Выход может быть найден только через восстановление и развитие перерабатывающих производств, которые позволят использовать всю низкотоварную древесину и технологические отходы. В Стратегии развития лесного комплекса страны до 2030 г. есть объективные предпосылки для возвращения многих предприятий к хлыстовой технологии при условии решения проблем с транспортом длинномерной древесины по дорогам общего пользования.

Надо отметить, что проблема комплексного использования древесины сдвинута с нулевой точки как на федеральном, так и на региональном уровнях. Достигнуты соглашения с крупными компаниями по инвестированию в лесопромышленный комплекс региона финансовых средств для создания перерабатывающих мощностей, определена общая концепция развития технологий переработки древесины и утверждены места размещения таких производств в регионе.

Как было отмечено выше, проблему повышения эффективности лесного комплекса в Дальневосточном федеральном округе предстоит решать при работе предприятий в истощенных лесосырьевых районах с повышенным содержанием смешанных перестойных и низкокачественных древостоев. Вовлечение в производство всей заготовленной древесной массы позволит увеличить срок действия существующих лесозаготовительных предприятий, повысить выход товарной продукции, очистить места рубок от захламенности, создать рабочие места, улучшить благосостояние населения, проживающего в лесных поселках.

Поскольку уровень прогрессивности лесопромышленного производства в мире определяется степенью переработки древесины, крупнейшие игроки лесопромышленной отрасли региона (ОАО «Тернейлес» в Приморском крае, RFP Group в Хабаровском крае и др.) идут по пути создания вертикально ин-

тегрированных лесопромышленных комплексов. Производственная структура этих компаний включает в себя 3 основные составляющие: лесозаготовку, деревообработку и химическую переработку древесины с использованием низкокачественного сырья и древесных отходов.

Наиболее спорным, вызывающим многочисленные дискуссии, является вопрос перспективы развития технологии лесозаготовок. Буквально 20–30 лет назад в стране около 96 % от общего объема древесины заготавливалось по хлыстовой технологии. За последние годы по ряду объективных и субъективных причин данная технология уже не является доминирующей, и ее доля значительно снизилась. По оценкам экспертов [33], в Канаде хлыстовая технология доминирует, в США и Норвегии около 50 % лесозаготовок выполняют данным способом [8, 31, 34]. Мотивами его реализации в этих странах называют стремление лесоперерабатывающих производств получать длинномерное сырье с целью производства пиломатериалов возможно большей длины, имеющих более высокую цену, а также обеспечение сырьем в виде балансовой древесины целлюлозно-бумажного производства. Из всех стран с развитой лесной промышленностью полностью по сортиментной технологии работают лишь Финляндия и Швеция, где преобладают одновозрастные хвойные леса с высокими размерно-качественными характеристиками, в которых своевременно и в полном объеме проводились все стадии рубок ухода.

Статистические данные, полученные на лесопромышленных предприятиях в Дальневосточном федеральном округе, ранее реализующих технологический процесс лесозаготовок с вывозкой с лесосек полуфабриката готовой продукции в виде хлыстов (полухлыстов), показывают, что на лесопромышленный склад предприятия доставлялось до 75 % заготовленной древесины. В процессе разделки хлыстов на круглые лесоматериалы (пиловочник) дополнительно из объема деловой древесины терялось еще до 20–25 % низкокачественной древесины и древесных отходов, которые концентрировались на лесопромышленном складе и могли быть использованы для производства дополнительных видов продукции, востребованных в регионе, например биотоплива [22]. При этом нельзя забывать о том, что на заготовку и утилизацию низкокачественной древесины и древесных отходов лесопромышленником затрачиваются определенные финансовые средства, компенсация которых закладывается в затраты на производство товарной продукции, имеющей спрос на рынке. Это приводит к тому, что себестоимость 1 м³ круглых лесоматериалов (пиловочника 1–2 сорта) за счет подобной компенсации увеличивается в 1,2–1,3 раза [12].

Результаты исследования и их обсуждение

В случае реализации сортиментной технологии основной продукцией, вырабатываемой из тонкомерных деревьев, являются балансы, составляющие до 30 % объема всей заготавливаемой древесины. Трудоемкость производства балансов превышает трудоемкость производства пиловочника более чем на 40 %, при этом средняя цена балансов ниже цены на пиловочник на 26–30 %. Практика современного лесопользования в Дальневосточном феде-

ральном округе показывает, что практически вся тонкомерная и низкотоварная древесина в настоящее время оставляется на лесосеке как невостребованная, принося не только экономический, но и значительный экологический ущерб лесной среде и моральный ущерб населению, проживающему в районах проведения лесозаготовок. Особенно это актуально при промышленной разработке смешанных лесных насаждений с низким классом бонитета [13].

В связи с этим остро встают вопросы: каким образом можно решить проблему рационального использования древесины в современных рыночных условиях на лесопромышленных предприятиях, имеющих в аренде смешанные леса с древесиной низкого класса товарности, и в каком направлении целесообразно развивать технологию лесозаготовок, с помощью которой могут быть реализованы поставленные перед отраслью задачи? Эти вопросы являются стратегическими, поскольку переход на другую технологию связан с частичным отказом от парка используемых систем лесных машин и технологического оборудования, со значительными материальными затратами и затратами времени на внедрение и отработку новых технологий на производственных предприятиях [5].

Выходом из сложившейся ситуации, по нашему мнению, может стать технология, ранее используемая лесозаготовительными предприятиями в СССР, но реализуемая на базе современных систем лесных машин и технологического оборудования. Данная технология заключается в проведении подсортировки деревьев по размерно-качественным характеристикам в процессе выполнения операций на лесосечных работах и вывозке с лесосек всей заготовленной древесины с последующей ее переработкой на пилопродукцию (своими силами или сторонними потребителями). При этом балансы, низкокачественная древесина поставляются в виде сырья для целлюлозно-бумажной промышленности, а неиспользуемые отходы и древесные остатки идут на получение тепловой и электрической энергии для собственного потребления или удовлетворения потребностей сторонних организаций.

Новым в данном предложении является то, что весь технологический процесс предлагается осуществлять по технологии «единого пакета» с сокращением времени на выполнение транспортно-переместительных операций. Операцию обезличенной (не имеющей высоких требований к размерам выпиленных сортиментов) раскряжевки круглых лесоматериалов, предназначенных для производства балансов, рекомендуется производить либо непосредственно на верхнем складе (с использованием мобильной специализированной установки для пачковой раскряжевки), либо на нижнем лесопромышленном складе (с использованием стационарной установки для пачковой раскряжевки).

При этом в систему лесных машин для реализации предлагаемого технологического процесса по первому сценарию (сортиментная технология) входят: харвестер с прицепным формировочно-транспортным модулем (ФТМ) (рис. 5); форвардер для сбора и транспортировки пиловочника; трактор (либо основной форвардер) для доставки ФТМ с низкокачественным долготьем на верхний склад; погрузчик перекидного типа с установкой для пачковой раскряжевки долготья, выполненный, например, по принципу установки, подробно описанной в [17].

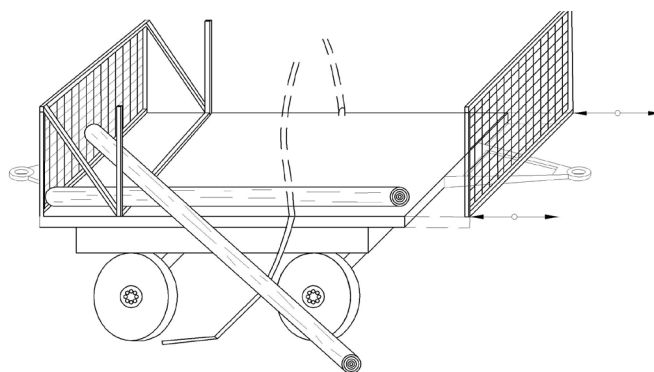


Рис. 5. Прицепной формирующе-транспортный модуль

Fig. 5. Trailed formation-transport module

Технологический процесс лесозаготовки в данном случае (рис. 6) производится с подсортировкой древесины по размерно-качественным характеристикам: харвестер срезает отведенные в рубку деревья и, в зависимости от качества и породы дерева, производит его обработку по определенной технологической схеме. При этом деревья, подходящие по своим характеристикам для производства пиловочника, обрабатываются по традиционной для харвестера схеме (обрезка сучьев и раскряжевка ствола, укладка сортиментов сбоку от машины). Низкокачественные деревья, подходящие только для производства балансов и топливной древесины, после срезания подтягиваются манипулятором вдоль оси машины (справа или слева в зависимости от места срезания) для дальнейшей обработки. В процессе протягивания через харвестерную головку ствол укладывается комлевой частью в приемное устройство ФТМ. После выполнения реза на установленной длине (обычно половина длины ствола дерева) отрезанная часть ствола остается в ФТМ, а оставшаяся обрабатывается в той же последовательности.

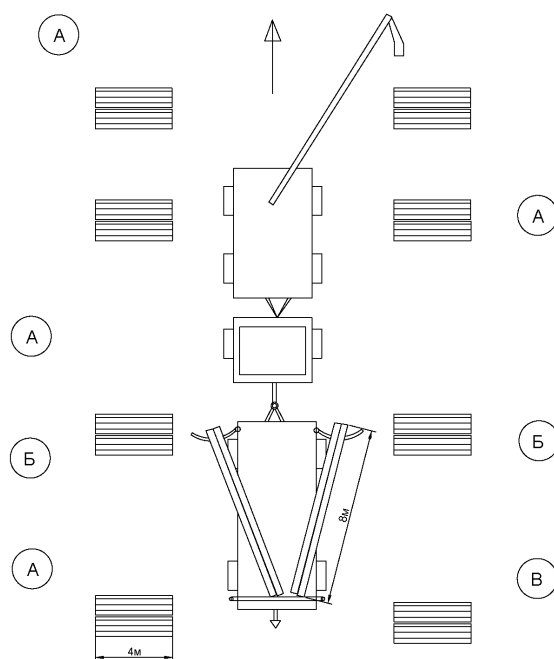


Рис. 6. Технология работы харвестера с подсортировкой древесины (А, Б, В – пачки круглых лесоматериалов различных сортогрупп)

Fig. 6. Harvester technology with wood sorting (A, B, B – bundles of round timber of various group types)

После заполнения ФТМ (время заполнения зависит от запаса леса и качества насаждения на разрабатываемом лесном участке) транспортируется трактором (основным форвардером) на верхний склад. На складе погрузчик перекидного типа со смонтированной на нем установкой для пачковой раскряжевки последовательно производит раскряжевку всей пачки круглых лесоматериалов на балансы и, не выпуская отпиленные лесоматериалы из захвата, выполняет их перегрузку в штабель или на автомобильный лесовозный подвижной состав. Процесс раскряжевки осуществляется непосредственно на ФТМ, доставляющем лесоматериалы от лесозаготовительной машины на верхний склад.

В систему лесных машин для реализации технологического процесса по второму сценарию (хлыстовая технология) входят: валочно-пакетирующая машина (ВПМ) с прицепным формировочно-транспортным модулем, скиддер и процессор.

Технологический процесс лесозаготовки по данному варианту производится с подсортировкой древесины по размерно-качественным характеристикам, которая выполняется в процессе работы ВПМ. Деревья, подходящие по своим характеристикам для производства пиловочника, обрабатываются по традиционной для ВПМ схеме (срезание и укладка дерева в пачку на вырубку). Низкокачественные деревья, годные только для производства балансов и топливной древесины, укладываются в ФТМ, который после заполнения транспортируется скиддером на верхний склад. На верхнем складе формируются 2 штабеля деревьев различного назначения. Штабели обрабатываются процессором с получением пиловочника (из высококачественных деревьев) и полухлыстов (из низкокачественных деревьев). Оба вида продукции отгружаются на нижний лесопромышленный склад, на котором полухлысты раскряжевываются на балансы с помощью стационарной установки для пачковой раскряжевки.

При использовании предлагаемых вариантов технологического процесса значительно снижается объем энергоемких погрузочно-разгрузочных и транспортно-переместительных операций, в разы сокращается время на раскряжевку единицы продукции, что позволяет в значительной мере снизить себестоимость заготовки балансов и топливной древесины. Кроме того, появляется реальная возможность повысить степень использования всего объема древесины, отведенного в рубку, а также уменьшить экологические риски и пожарную опасность на арендуемых лесных территориях.

Предложенная технология позволит заготавливать и использовать всю стволовую древесину по соответствующему назначению (в зависимости от ее качества, породы и размеров) и может быть рекомендована предприятиям, расположенным недалеко от целлюлозно-бумажного комбината или других потребителей низкотоварной древесины и стволовых остатков.

В связи с поставленными перед лесопромышленниками региона задачами повышения эффективности использования древесных ресурсов и обеспечения дополнительным сырьем смежных деревоперерабатывающих производств необходимо выбрать технологию лесозаготовок и систему машин для ее реализации. При этом технология должна с максимальной эффективностью решать экономические, экологические и социальные проблемы, связанные с лесным

сектором. Подобная задача решается с помощью различных методов экономико-математического моделирования [28]. Одной из главных целей производственно-экономической системы является максимально возможное достижение планируемой прибыли (рентабельности). Для лесопромышленного комплекса дальневосточного региона в сложившихся рыночных и территориально-производственных условиях производство должно характеризоваться высокой степенью доходности на всех этапах работы, включая совокупность получения различных полезностей и использования разных технологических процессов и оборудования для реализации этих полезностей [27, 30, 32]. Основной целью функционирования любого технологического производства должен быть выпуск продукции такого объема и качества, которые обеспечивали бы максимальную доходность. Этого можно достичь при условии, что себестоимость единицы продукции будет, по крайней мере, не больше значения, установившегося в конкретном регионе с его транспортными и энергетическими тарифами, сложившейся производственной логистикой и другими объективными факторами.

В любом производстве экономико-математическая модель зависимости величины прибыли предприятия от реализации всей произведенной продукции может быть представлена следующим образом:

$$\Pi = \sum B - \sum Z \Rightarrow \max \sum \sum ,$$

где B – выручка от реализации продукции; Z – затраты на производство продукции.

На исследуемые переменные налагаются условие «положительности» и ряд ограничений по следующим производственным условиям: по выполнению плана выпуска продукции (пиловочника и баланса); по условию образования НКДО на различных технологических участках и концентрации их в качестве сырья для дальнейшей реализации.

Заключение

В связи с прогрессирующим истощением и снижением качества древесных ресурсов Дальневосточного региона, понижением их природоохранного и экологического потенциала с учетом возрастающих экологических требований необходимо переходить к новой стратегии лесопользования с применением ресурсосберегающих технологий лесозаготовок и систем машин для их реализации.

Предлагаемые в статье варианты технологического процесса лесозаготовок позволят значительно снизить объем энергоемких погрузочно-разгрузочных и транспортно-переместительных операций, сократить время на раскряжевку единицы древесной продукции, повысить степень использования объема древесины, отведенного в рубку, а также уменьшить степень экологических рисков и пожарной опасности на арендуемых лесных территориях и могут быть рекомендованы предприятиям, расположенным вблизи целлюлозно-бумажного комбината или других потребителей низкотоварной древесины и стволовых остатков.

Предложенная экономико-математическая модель даст возможность отразить аспекты комплексного использования лесосырьевых ресурсов и выбрать наиболее эффективный технологический процесс для его реализации лесопромышленным предприятием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В., Григорьев И.В. Конструктивные особенности канатных лесотранспортных систем на мягких пневматических опорах // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 86–95.

Abuzov A.V., Grigorev I.V. Design Features of Cable Forestry Systems on Soft Pneumatic Supports. *Lesotekhnicheskiy zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 1(37), pp. 86–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/9>

2. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 125–134.

Voronov R.V., Markov O.B., Grigorev I.V., Davtyan A.B. Mathematical Model of the Modular Approach for Selection of a System of Machines for Creation and Operation of Forest Plantations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 5, pp. 125–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.125>

3. Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Григорьев И.В., Каляшов В.А., Рудов С.Е., Иванов В.А. Проблемы и перспективы лесозаготовительного производства в условиях районов распространения вечной мерзлоты // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3(51). С. 59–67.

Grigorev G.V., Dmitriyeva I.N., Grigorev I.V., Kalyashov V.A., Rudov S.E., Ivanov V.A. Problems and Prospects of Logging Production in Permafrost Distribution Areas. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 3(51), pp. 59–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-3-59-67>

4. Григорьев И.В. Комментарии к стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года // Бюл. Ассоц. ЛЕСТЕХ. 2021. № 3(5). С. 38–48.

Grigorev I.V. Comments on the Russian Federation Forestry Development Strategy Until 2030. *Vyulleten' Assotsiatsii "LESTEKH"*, 2021, no. 3(5), pp. 38–48. (In Russ.).

5. Григорьев И.В., Винокуров С.Л. Сравнение вариантов систем машин для малообъемных лесозаготовок // Вестн. АГАТУ. 2021. № 3(3). С. 51–62.

Grigorev I.V., Vinokurov S.L. Comparison of Machine System Options for Low-Volume Logging. *Vestnik AGATU*, 2021, no. 3(3), pp. 51–62. (In Russ.).

6. Григорьев И.В., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И. Перспективы модульных систем машин для лесозаготовительного производства в Якутии // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 9(35). С. 74–77.

Grigorev I.V., Grigorev M.F., Stepanova D.I. Perspectives for Modular Machine Systems in the Logging Industry of Yakutia. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice*, 2017, vol. 5, no. 9(35), pp. 74–77. (In Russ.).

7. Григорьев И.В., Зорин М.В., Григорьев Г.В., Рудов С.Е., Швецова В.В., Калита Г.А. Анализ способов укрепления временных транспортных путей для трелевки и вывозки древесины // Деревообраб. пром-сть. 2021. № 2. С. 10–29.

Grigorev I.V., Zorin M.V., Grigorev G.V., Rudov S.E., Shvetsova V.V., Kalita G.A. Analysis of Ways to Strengthen Temporary Transport Routes for Skidding and Hauling Timber. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' = Woodworking Industry*, 2021, no. 2, pp. 10–29. (In Russ.).

8. Григорьев И.В., Петров М.Е. Дополнительные технические опции для повышения безопасности, надежности и энергоэффективности лесных машин // Вестн. АГАТУ. 2021. № 3(3). С. 73–81.

Grigorev I.V., Petrov M.E. Additional Technical Options to Improve Safety, Reliability, and Energy Efficiency of Forestry Machines. *Vestnik AGATU*, 2021, no. 3(3), pp. 73–81. (In Russ.).

9. Григорьев И.В., Пудова Т.М., Винокуров С.Л. Перевозка лесоматериалов по железной дороге // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства: сб. материалов науч.-практ. конф., 20 марта 2019 г. / редкол.: В.В. Устинова, М.В. Слепцова. Якутск: СВФУ, 2019. С. 5–9.

Grigorev I.V., Pudova T.M., Vinokurov S.L. Transport of Timber by Rail. *Potential of Science and Education: Modern Research in Agronomy, Land Management, Forestry. Proceedings of the Scientific-Practical Conference, 20 March 2019*. Yakutsk, SVFU Publ., 2019, pp. 5–9. (In Russ.).

10. Григорьев И.В., Рудов С.Е., Каляшов В.А. Транспортно-технологические комплексы на базе лесных машин и самоходных лебедок для проведения рубок леса на склонах // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 15 апр. 2021 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень: ТИУ, 2021. С. 59–62.

Grigorev I.V., Rudov S.E., Kalyashov V.A. Transport-Technological Complexes Based on Forest Machines and Automatic-Tensioning Winches for Logging on Slopes. *Transport and Transport-Technological Systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, 15 April 2021*. Tyumen, 2021, pp. 59–62. (In Russ.).

11. Марков О.Б., Воронов Р.В., Давтян А.Б., Григорьев И.В., Калита Г.А. Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Деревообраб. пром-сть. 2021. № 1. С. 16–26.

Markov O.B., Voronov R.V., Davtyan A.B., Grigorev I.V., Kalita G.A. Mathematical Model for Selection a System of Machinery for Creation and Maintenance of Forest Plantations. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' = Woodworking Industry*, 2021, no. 1, pp. 16–26. (In Russ.).

12. Морковина С.С. Экономический анализ применения инновационных технологий в лесном хозяйстве страны // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2018. Т. 15, № 11. С. 27–34.

Morkovina S.S. Economic Analysis for Application Innovative Technologies in the Country's Forestry. *FES: Finansy. Ekonomika. Strategiya = FES: Finance. Economy. Strategy*, 2018, vol. 15, no. 11, pp. 27–34. (In Russ.).

13. Морковина С.С., Кожемякин Д.Ю. Формирование инструментария саморегулирования деятельности в лесном хозяйстве // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 7(43). С. 363–367.

Morkovina S.S., Kozhemyakin D.Yu. Formation of Self-Regulatory Instrumentation for Activities in Forestry Section. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice*, 2018, vol. 6, no. 7(43), pp. 363–367. (In Russ.).

14. Морковина С.С., Нетребская О.А., Манмарева В.В. Рисковые факторы государственного управления и их оценка в лесном хозяйстве России // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2021. Т. 9, № 2(53). С. 76–91.

Morkovina S.S., Netrebskaya O.A., Manmareva V.V. Risk Factors of Public Administration and Their Assessment in Forestry in Russia. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Actual Directions of Scientific Researches of the*

XXI Century: Theory and Practice, 2021, vol. 9, no. 2(53), pp. 76–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2021-9-2-76-91>

15. Морковина С.С., Рубцова А.И. Анализ инвестиционной привлекательности предприятий холдингового типа // Общество и экономическая мысль в XXI в.: пути развития и инновации: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию Юбилею филиала, 31 марта 2021 г. / редкол.: А.М. Сысоев и др. Воронеж: Науч. книга, 2021. С. 140–144.

Morkovina S.S., Rubtsova A.I. Analysis of Investment Attractiveness of Holding Companies. *Society and Economical Thought in XXI Century: Ways of Development and Innovations. Proceedings of 9th International Scientific-Practical Conference devoted to the 65th anniversary of the Plekhanov Russian University of Economics in Voronezh*. Voronezh, Nauchaya kniga Publ., 2021, pp. 140–144. (In Russ.).

16. Нетребская О.А., Морковина С.С. Системные риски в лесном хозяйстве России: от идентификации к превентивному управлению // Современные подходы к трансформации концепций государственного регулирования и управления в социально-экономических системах: сб. науч. тр. X Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки и технологий в Российской Федерации, 18–25 февр. 2021 г. Курск: Фин. ун-т при Правительстве Российской Федерации, Курский фил., 2021. С. 485–489.

Netrebskaya O.A., Morkovina S.S. Systematical Risks in Russian Forestry: From Identification to Preventive Management. *Modern Approaches to Transformation of Concepts for State Regulation and Management in Socio-Economic Systems: Proceedings of the 10th International Scientific-Practical Conference devoted to the Year of Science and Technology in the Russian Federation, 18–25 February 2021*. Kursk, FinU Publ., 2021, pp. 485–489. (In Russ.).

17. Родионов В.Е., Дербин М.В., Удальцов В.Н., Савенков Д.А., Серёдкина В.С., Григорьев И.В. Установка для исследования усилия бесстружечного резания упакованных отходов лесозаготовок криволинейными режущими кромками // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38). С. 100–104.

Rodionov V.E., Derbin M.V., Udaltsov V.N., Savenkov D.A., Seredkina V.S., Grigorev I.V. Installation for Studying the Force of Chipless Cutting of Packed Logging Waste with Curved Cutting Edges. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 2(38), pp. 100–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-100-104>

18. Рудов С.Е., Григорьев И.В. Пути повышения эффективности работы систем машин для сортиментной заготовки древесины // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы VII Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием Петрозаводск: ПетрГУ, 2021. С. 168–169.

Rudov S.E., Grigorev I.V. Ways to Improve the Efficiency of Timber Sorting Machine Systems. *Increasing the Efficiency of the Forest Complex: Proceedings of the 7th All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Attendance*. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2021, pp. 168–169. (In Russ.).

19. Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Эффективность лесопользования в криолитозоне // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Воронеж. ГАУ, 2020. С. 460–463.

Rudov S.E., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Grigorev M.F., Grigoreva A.I. Efficiency of Forest Management in Cryolitic Zone. *Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference*. Voronezh, Voronezhskiy GAU Publ., 2020, pp. 460–463. (In Russ.).

20. Рябухин П.Б., Абузов А.В. Технологии и оборудование для проведения рубок лесных насаждений. Хабаровск: ТОГУ, 2017. 244 с.

Ryabukhin P.B., Abuzov A.V. *Technology and Equipment for Forest Logging*. Khabarovsk, TOGU Publ., 2017. 244 p. (In Russ.).

21. Тамби А.А., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Помигуев А.В., Калита О.Н., Григорьев В.И. Технологическая интеграция лесопромышленных предприятий // *Деревообраб. пром-сть*. 2021. № 1. С. 26–37.

Tambi A.A., Grigorev I.V., Davtyan A.B., Pomiguyev A.V., Kalita O.N., Grigorev V.I. Technological Integration of Timber Enterprises. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Woodworking Industry, 2021, no. 1, pp. 26–37. (In Russ.).

22. Тамби А.А., Морковина С.С., Григорьев И.В., Григорьев В.И. Развитие циркулярной экономики в России: рынок биотоплива // *Лесотехн. журн.* 2019. Т. 9, № 4(36). С. 173–185.

Tambi A.A., Morkovina S.S., Grigorev I.V., Grigorev V.I. Development of Circular Economy in Russia: Biofuel Market. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 4(36), pp. 173–185. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/19>

23. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryayev S., Burgonutdinov A. Impulse Control Technology for Improving Steering Control Systems of the Tracked Vehicles. *International Review of Automatic Control (IREACO)*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 172–178. <https://doi.org/10.15866/ireaco.v14i3.20858>

24. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Akinin D. Improving the Quality of Sorting Wood Chips by Scanning and Machine Vision Technology. *Journal of Forest Science*, 2021, vol. 67, no. 5, pp. 212–218. <https://doi.org/10.17221/10/2020-JFS>

25. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Akinin D. Russian Sawmill Modernization (a Case Study). Part 2: Improving the Efficiency of Wood Chipping Operations. *International Wood Products Journal*, 2021, vol. 12, iss. 2, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1080/20426445.2020.1871276>

26. Grigorev I., Shadrin A., Voronova A., Kostyukevich N., Levushkin D., Borisov V., Diev R. Improving the Efficiency of Wood Chipping Operations. *INAMTEH – Agricultural Engineering*, 2020, vol. 61, no. 2, pp. 217–224. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-24>

27. Ivanova A.V., Morkovina S.S., Kolesnichenko E.A., Matveev S.M. Management of Reforestation Processes Using Innovative Technologies. *Vision 2020: Sustainable Economic Development and Application of Innovation Management from Regional Expansion to Global Growth. Proceedings of the 32nd International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Spain, Seville, 15–16 November 2018*. IBIMA Publ., 2018, pp. 1817–1823.

28. Kharchenko N.N., Morkovina S.S., Kapitonov D.Y., Lisova O.S. Forest Ecosystem Services in the System of Sustainable Forest Use of Sparsely Forested Regions of Russia. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 10, pp. 3567–3572.

29. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing Quality of Road Pavements Through Adhesion Improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 678–694.

30. Morkovina S.S., Panyavina E.A., Rezanov V.K., Sukhova V.E. Function Value Analysis in Forestry Practice. *Vision 2020: Sustainable Economic Development and Application of Innovation Management from Regional Expansion to Global Growth. Proceedings of the 32nd International Business Information Management Association Conference, IBIMA. (Spain, Seville, 15–16 November 2018)*. IBIMA Publ., 2018, pp. 4419–4425.

31. Laakkonen A., Hujala T., Pykäläinen J. Integrating Intangible Resources Enables Creating New Types of Forest Services – Developing Forest Leasing Value Network in Fin-

land. *Forest Policy and Economics*, 2019, vol. 99, pp. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.07.003>

32. Naumov V., Angelstam P., Elbakidze M. Barriers and Bridges for Intensified Wood Production in Russia: Insights from the Environmental History of a Regional Logging Frontier. *Forest Policy and Economics*, 2016, vol. 66, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.02.001>

33. Young J.L., Duinker P.N. Canada's National Forest Strategies: A Comparative Analysis. *Forestry Chronicle*, 1998, vol. 74, no. 5, pp. 683–693. <https://doi.org/10.5558/tfc74683-5>

34. Zasada J.S. Natural Regeneration of Interior Alaska Forest. Seed, Seedbed, and Vegetative Reproduction Consideration. *Fire in the Northern Environment: A Symposium*. USA, Portland, 1971, pp. 231–246.

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*383

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-106-120

Математическое обоснование сопротивления движению автотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных дорог

В.С. Прокопец¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [ABZ-9286-2022](https://orcid.org/0000-0002-6066-2562),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6066-2562>

В.Г. Козлов², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [G-9613-2017](https://orcid.org/0000-0003-2571-8687),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>

А.В. Скрыпников¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-8824-2019](https://orcid.org/0000-0003-1073-9151),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

Н.Г. Пономарева³, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631),

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

Д.М. Левушкин⁴, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAS-4522-2021](https://orcid.org/0000-0002-4787-6371),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>

Ю.А. Боровлев¹, соискатель; ResearcherID: [HCH-1952-2022](https://orcid.org/0000-0003-3702-6194),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, просп. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия, 394036; volodayprokopes@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru, borovlevyury@ya.ru

²Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Ми-чурина, д. 1, г. Воронеж, Россия, 394087; vya-kozlov@yandex.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Север-ной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.ponomareva@narfu.ru

⁴Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институт-ская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; levushkin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 13.01.22 / Одобрена после рецензирования 19.04.22 / Принята к печати 21.04.22

Аннотация. Применение существующих в настоящее время методов и критериев оценки технико-эксплуатационных характеристик и состояния лесовозных автомобильных дорог требует больших затрат времени, хотя и позволяет с достаточной точностью описать состояние отдельных элементов дороги, наметить пути устранения выявленных неисправностей и определить объемы работ по их устранению. Отличительной особенностью лесозаготовительного производства является одновременная эксплуатация разветвленной сети лесовозных автомобильных дорог различных категорий с эксплуатационными характеристиками, меняющимися в зависимости от погодных условий, передислокации мест рубок, интенсивности движения и других факторов. Поэтому существующие способы обоснования зависимостей составляющих сопротивление движения от прочности дорожной конструкции оказываются малоприменимыми для оперативной оценки технико-эксплуатационного состояния дорог при планировании ремонтных работ. Цель исследования – совершенствование методологических основ тягово-эксплуатационных расчетов для лесотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных автомобильных дорог. Установлено, что при

расчете сопротивления качению необходимо учитывать его составляющую, обусловленную деформацией конструкции. На величину этой составляющей влияет модуль упругости дорожной конструкции. Зависимость, полученная для составляющей сопротивления качению за счет деформации дорожной конструкции покрытия лесовозных дорог, позволяет повысить точность тягово-эксплуатационных расчетов на стадии проектирования лесовозной автомобильной дороги и может быть использована в целевой функции при сравнении вариантов (при вариантном проектировании). Знание математической зависимости составляющей сопротивления движению от прочности дорожной конструкции дает возможность использовать сопротивление движению в качестве косвенной характеристики прочности дорожной конструкции, а также в качестве комплексного качественного показателя состояния проезжей части дороги.

Ключевые слова: сопротивление движению, сопротивление качению, прочность дорожной одежды, элемент дороги, нагрузка дорожной конструкции, лесовозные дороги, тягово-эксплуатационные расчеты для лесотранспорта

Для цитирования: Прокопец В.С., Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Пономарева Н.Г., Левушкин Д.М., Боровлев Ю.А. Математическое обоснование сопротивления движению автотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 106–120. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-106-120>

Original article

Mathematical Justification of Vehicular Traffic Resistance in Relation to Structural Surface Conditions of Hauling Roads

Vladimir S. Prokopets¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABZ-9286-2022](https://orcid.org/0000-0002-6066-2562),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6066-2562>

Vaycheslav G. Kozlov², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [G-9613-2017](https://orcid.org/0000-0003-2571-8687),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>

Alexey V. Skrypnikov^{1✉}, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAE-8824-2019](https://orcid.org/0000-0003-1073-9151),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

Natalia G. Ponomareva³, Candidate of Engineering, Assoc.Prof.;
ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631), ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

Dmitry M. Levushkin⁴, Candidate of Engineering, Assoc.Prof.;
ResearcherID: [AAS-4522-2021](https://orcid.org/0000-0002-4787-6371), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>

Yuriy A. Borovlev¹, External PhD Student; ResearcherID: [HCH-1952-2022](https://orcid.org/0000-0003-3702-6194),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, prosp. Revolyutsii, 19, Voronezh, 394036, Russian Federation; volodayprokopec@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru✉, borovlevyury@ya.ru

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, ul. Michurina, 1, Voronezh, 394087, Russian Federation; vya-kozlov@yandex.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.ponomareva@narfu.ru

⁴Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University (National Research University), ul. Pervaya Institutskaya, 1, Mytishchi, 141005, Russian Federation; levushkin@mgul.ac.ru



Received on January 13, 2022 / Approved after reviewing on April 19, 2022 / Accepted on April 21, 2022

Abstract. The currently available methods for evaluating technical-operational characteristics and conditions of hauling roads are time-consuming. Although, they provide a sufficiently accurate description of the conditions of certain road components. Furthermore, they give the possibilities to identify ways for elimination of the constructional defects and determine the work extent to correct them. A peculiarity of forestry production is the simultaneous exploitation of a branching transport network with different types of subsidiary hauling roads, which depends on weather conditions, change of logging locations, traffic intensity, and other factors. Therefore, the available methods, which clarify the relationships between the traffic resistance and strength of the road construction, are poorly usable for rapid estimation of the technical and operational conditions in renovation planning. The purpose of the study is to improve the methodological fundamentals of traction-operational calculations for timber transportation according to the constructional state of the hauling roads. It has been determined that the calculation of the rolling resistance must include the factor of structural deformation. It is influenced by the modulus of elasticity for the surface structural materials. The resulting relationship makes it possible to increase the accuracy of traction-operational calculations at the project phase of the hauling road building. It can be included into the target function for comparing alternatives in the case of optional project planning. The mathematical aspect in the evaluation of the traffic resistance gives an opportunity to use this parameter as an indirect characteristic of the constructional strength of a road, as well as it can be a comprehensive qualitative indicator of the condition of a pavement.

Keywords: traffic resistance, rolling resistance, strength of pavement, road component, load of road structure, hauling roads, traction-operational calculations for timber transportation

For citation: Prokopets V.S., Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Ponomareva N.G., Levushkin D.M., Borovlev Yu.A. Mathematical Justification of Vehicular Traffic Resistance in Relation to Structural Surface Conditions of Hauling Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 106–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-106-120>

Введение

Отличительной особенностью лесозаготовительного производства является одновременное использование разветвленной сети дорог различных категорий с эксплуатационными характеристиками, меняющимися в зависимости от погодных условий, передислокации мест рубок, интенсивности движения и других факторов. Поэтому разработанные в настоящее время методы и критерии оценки технико-эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог, хотя и позволяют с достаточной точностью охарактеризовать состояние отдельных элементов дороги, наметить пути устранения выявленных неисправностей и определить объемы работ по их устранению, оказываются малоприменимыми для оперативной оценки состояния лесовозных дорог, являясь затратными по времени. Таким образом, исследования, направленные на разработку критериев и методов оперативной оценки состояния эксплуатируемых лесовозных дорог с целью планирования работ по их ремонту и текущему содержанию актуальны.

Вопросам влияния различных факторов на состояние транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог, в том числе сопротивлению качению, посвящены работы Кулона Ж.А., Горячкина В.П., Пинегина С.В., Бирули А.К., Говорущенко Н.Я., Курьянова В.К., Кондрашовой Е.В., Скрыпникова А.В. [2, 5, 6]. Изучением гистерезисных потерь в шинах занимались многие отечественные и зарубежные исследователи: Шелухин А.С., Омелянова А.Е., Вирабова Р.В., Петрушова В.А. и др. [1, 3, 14 и др.]; полученные зависимости описывают сопротивление качению в ведомом режиме с учетом проскальзывания в контакте. Уравнения, приведенные в работах Курьянова В.К., Сушкова С.И., Бурмистровой О.Н., достоверно отражают процессы, протекающие в дорожной конструкции, но малопригодны для практических расчетов. Коэффициенты, входящие в эти уравнения, должны быть константами грунта, т. е. величинами, не зависящими от размеров пятна контакта, нормальной нагрузки, скорости движения машины, а на самом деле такими не являются. Кроме того, отсутствует методика определения названных коэффициентов [4, 11, 13, 15].

Цель работы – совершенствование методологических основ тягово-эксплуатационных расчетов для лесотранспорта.

Установление зависимости сопротивления движению от прочности дорожной одежды, кроме повышения точности тягово-эксплуатационных расчетов, позволит использовать сопротивление движению в качестве косвенной характеристики прочности дорожной одежды.

Объекты и методы исследования

Рассмотрим дорожную конструкцию, загруженную равномерно распределенной по площади круга нагрузкой. Согласно теореме Клайперона, потенциальная энергия упругого тела, накапливаемая под действием внешних сил в единице объема, определяется выражением

$$d\Pi = \frac{1}{2} p \ell \omega dr, \quad (1)$$

где p – давление в центре элементарной площадки, МПа; ℓ – расстояние от центра загрузки до центра элементарной площадки, м; ω – перемещение в центре элементарной площадки, м; dr – радиус элементарной площадки, м.

Возьмем случай загрузки упругого полупространства нагрузкой, равномерно распределенной по площади круга радиусом R . Составим выражение для перемещения точки C , находящейся на поверхности ($Z = 0$), но в пределах загруженного круга ($\ell \leq R$) (рис. 1). Проведем через точку C секущую MC и в бесконечной близости другую M_1C и рассмотрим прогиб точки C от нагрузки, расположенной на элементарной площадке шириной dS . Площадь элементарной площадки:

$$dF = S d\varphi dS,$$

где S – расстояние от точки C до начала площадки, м; $d\varphi$ – угол между секущими MC и M_1C , ...°.

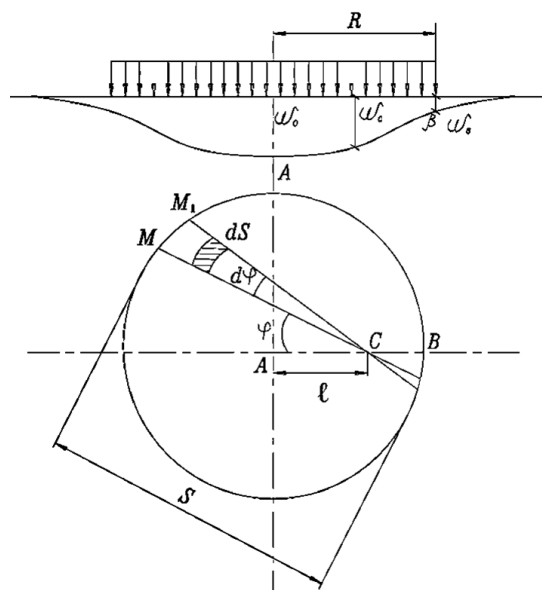


Рис. 1. Расчетная схема нагрузки дорожной конструкции

Fig 1. Computational scheme for the load applied on road structure

Нагрузка на площадку

$$dp = p dF = p S d\varphi dS.$$

От такой нагрузки точка C опускается на величину

$$d\omega = \frac{1-\mu^2}{\pi E} p dS d\varphi,$$

где μ – коэффициент трения; E – модуль упругости, МПа.

Полное перемещение точки C от всей нагрузки находится через интеграл:

$$\omega = \frac{1-\mu^2}{\pi E} p \int dS \int d\varphi.$$

Из рис. 1 видно, что интеграл, взятый по всей длине секущей, составит:

$$\int dS = \bar{S} = 2\sqrt{R^2 - \ell^2 \sin^2 \varphi} d\varphi,$$

где R – радиус загруженной площадки, м; ℓ – расстояние от центра загруженной площадки до точки C , м.

Полное перемещение точки C

$$\omega_C = 4p \frac{(1-\mu^2)}{\pi E} \int_0^{\pi/2} \sqrt{R^2 - \ell^2 \sin^2 \varphi} d\varphi. \quad (2)$$

Перемещение в центре загруженной площадки при $\ell = 0$:

$$\omega_0 = \frac{2(1-\mu^2)}{E} pR.$$

Перемещение на краю загруженной площадки при $\ell = R$:

$$\omega_R = \frac{4(1-\mu^2)}{E} pR = \frac{2}{\pi} \omega_0.$$

Выражение (2) представляет собой уравнение перемещения точки, лежащей в пределах загруженного круга. Перемещения могут быть вычислены с помощью таблиц эллиптических интегралов.

Для упрощения решения аппроксимируем кривую AB кривой второго порядка:

$$\omega = al^2 + bl + c,$$

где a, b, c – коэффициенты корреляции.

Для вычисления коэффициентов корреляции составим систему уравнений, исходя из граничных условий:

$$\begin{cases} \omega = al^2 + bl + c = \omega_0, & \ell = 0; \\ \frac{d\omega}{d\ell} = 2al + b = 0, & \ell = 0; \\ \omega = al^2 + bl + c = \frac{2}{\pi}\omega_0, & \ell = R. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, получим:

$$\begin{cases} a = \left(\frac{2}{\pi} - 1\right) \frac{\omega_0}{R^2}; \\ b = 0; \\ c = \omega_0. \end{cases}$$

Подставим коэффициенты в общее уравнение кривой:

$$\omega = \left[1 + \left(\frac{2}{\pi} - 1\right) \frac{\ell^2}{R^2}\right] \omega_0, \text{ при } \ell \leq R.$$

Уравнение кривой подставим в выражение (2) и проинтегрируем:

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} \int_0^R p\omega 2\pi l dl \approx 1,2853 p\omega_0 R^2.$$

Данное выражение определяет полную энергию деформации, накапливаемую цилиндром с радиусом основания, равным R . Однако под действием распределенной нагрузки деформации распространяются и за пределы загруженной площадки. Согласно [4, 10, 11], эти деформации могут быть определены следующим образом:

$$\omega = \frac{(1 - \mu^2) p R^2}{\pi E \ell}, \text{ при } \ell > R,$$

где p – давление, МПа; R – радиус загруженной площадки, м; ℓ – расстояние от центра загрузки до рассматриваемой точки, м.

Подставим это выражение в выражение (1) и проинтегрируем:

$$\Pi_2 = \frac{1}{2} \int_R^\infty \ell \omega 2\pi l dl.$$

После интегрирования и с учетом того, что на расстоянии от центра загрузки, равном 3 диаметрам штампа, деформации равны нулю, получим:

$$\Pi_2 = \frac{p^2 \pi R^2 (1 - \mu^2)}{E} \ell \Big|_R^{6R} = \frac{5 p^2 \pi R^3}{E} (1 - \mu^2).$$

Полная энергия, накапливаемая в полупространстве,

$$\Pi_0 = \Pi_1 + \Pi_2 = 18,2786 \cdot \frac{p^2 R^3 (1 - \mu^2)}{E}. \quad (3)$$

Часть энергии, накапливаемой в упругом полупространстве, восстанавливается после снятия нагрузки, поэтому для нахождения фактических

затрат энергии в выражение (3) необходимо ввести коэффициент $k_3 < 1$, зависящий от внутреннего трения в материале конструкции и учитывающий вязкие деформации:

$$\Pi_\phi = 18,2786 \cdot \frac{p^2 R^3 (1 - \mu^2)}{E} k_3.$$

Данное выражение определяет долю энергии деформации, рассеиваемую в дорожной конструкции после снятия нагрузки.

Для нахождения работы, которую совершает колесо на участке дороги, разобьем загруженную площадку на элементарные участки шириной dl и рассчитаем работу, выполняемую колесом на деформацию этой полоски (рис. 2, 3).

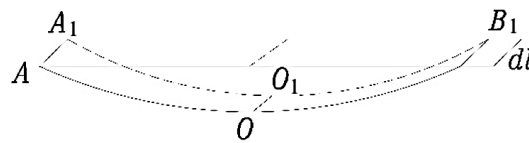


Рис. 2. Расчетная схема для вычисления коэффициента сопротивления движению

Fig. 2. Calculation scheme for estimation of the traffic resistance coefficient

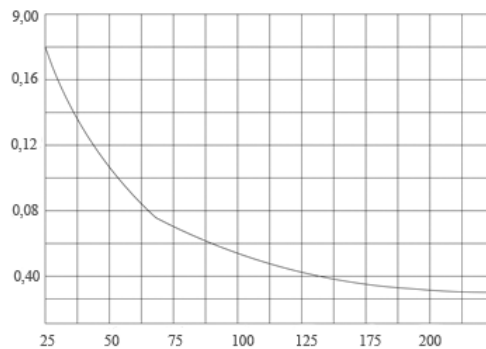


Рис. 3. Зависимость составляющей сопротивления движению, обусловленной прочностью дорожной конструкции, от модуля упругости, МПа

Fig. 3. Dependence between the traffic resistance and the strength of road construction, MPa

Эта работа определяется:

$$dA = \frac{1}{2} p dV, \quad (4)$$

где dV – объем элементарной полоски, м^3 .

Объем dV находится из выражения

$$dV = \int_{-R}^R \omega_{l < R} d\ell dl + 2 \int_R^{6R} \omega_{l > R} d\ell dl.$$

После интегрирования и упрощения получим:

$$dV = \frac{pR^2}{E} (1 - \mu^2) [2(\ln 6R - \ln R) + 1,9702] dl.$$

Подставляем это выражение в выражение (4) и интегрируем его с учетом коэффициента k_3 :

$$A_\phi = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{p^2 R^2 k_3}{E} (1 - \mu^2) [2(\ln 6R - \ln R) + 1,9702] dl.$$

Данное неравенство определяет работу, которую совершает колесо автопоезда на участке дороги длиной dl . Разделив результат вычисления по этому выражению на величину нагрузки на колесо и на пройденный путь, получим

коэффициент сопротивления движению за счет деформации дорожной конструкции:

$$f_g = \frac{A_\Phi}{\ell G_k} = 5,537 \cdot \frac{p^2 R^2 k_3}{E G_k} (\ell - \mu^2),$$

где G_k – вертикальная нагрузка на покрытие, Н.

С учетом того, что

$$p = \frac{G_k}{\pi R^2}$$

получим:

$$f_g = 5,5537 \cdot \frac{G_k k_3}{\pi^2 R^2 E} (1 - \mu^2).$$

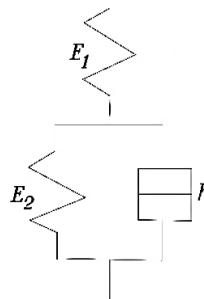
Коэффициент k_3 зависит от свойств материала дорожной конструкции, показывая, какая часть энергии упругой деформации поглощается материалом конструкции после снятия нагрузки.

В реальных условиях наблюдаются необратимые потери энергии в грунтах при снятии нагрузки вследствие затрат энергии: 1) на преодоление сил внутреннего неупругого сопротивления; 2) на рассеивание энергии за счет геометрического расхождения колебательных процессов, вызванных воздействием подвижной нагрузки; 3) на необратимые (пластические) деформации изменения объема и сдвига грунта.

В дорожной конструкции вследствие ее работы в стадии упруго-вязких деформаций преобладают потери энергии 2 первых видов, которые не приводят к образованию в грунте существенных необратимых деформаций и могут быть охарактеризованы различными моделями сплошной неидеально-упругой среды. Одной из моделей наиболее точно и просто описывающих упруго-вязкие деформации может служить модель, состоящая из последовательно-соединенных упругого и упруго-вязкого элементов, так называемая модель типичного тела (рис. 4).

Рис. 4. Расчетная модель дорожной конструкции: E_1 – динамический модуль упругости, МПа; E_2 – статический модуль упругости, МПа

Fig. 4. Computational model for road structure: E_1 – dynamic modulus of elasticity, МПа; E_2 – static modulus of elasticity, МПа



Результаты исследования и их обсуждение

Существуют и другие, более сложные модели, состоящие из большого количества простейших элементов. Однако эти модели не получили практического применения для решения задач о рассеивании энергии при колебаниях систем с внутренним трением ввиду сложности и существенной зависимости расчетных потерь энергии от скорости нагружения и разгружения, что находится в противоречии с данными исследований [1, 3, 9].

При мгновенном сжатии среды, свойства которой соответствуют модели, представленной на рис. 4, среду можно рассматривать как линейно-деформируемое тело, подчиняющееся закону Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1},$$

где ε_1 – перемещение границы среды; σ_1 – напряжение на поверхности среды, Н.

Если нагрузка сохраняет свое действие при $t \rightarrow \infty$ (t – время), тогда полная деформация определится выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \sigma \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) = \frac{\sigma}{E_{\text{ст}}},$$

где $E_{\text{ст}}$ – статический модуль упругости, МПа.

Для рассматриваемой модели среды справедливы системы уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_h + \sigma_{y_2} = \sigma; \\ \sigma_{y_1} = \sigma \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} \varepsilon_h = \varepsilon_{y_2}; \\ \varepsilon_{y_1} + \varepsilon_{y_2} = \varepsilon. \end{cases}$$

В них напряжения и деформации простейших элементов определяются зависимостями:

$$\sigma + n \frac{d\sigma}{dt} = E_{\text{ст}} \varepsilon + n E_g \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{и} \quad E_{\text{ст}} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2},$$

где n – число простейших элементов; $E_g = E_1$.

Последнее уравнение полностью определяет поведение среды в случае одноосного деформированного состояния. В данное уравнение входят 3 постоянные величины: статический и динамический модули упругости и коэффициент неупругого сопротивления h , – которые для каждой реальной среды должны устанавливаться экспериментально.

В обобщенной среде существуют 2 предельных значения деформаций: наименьшая при $\frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow \infty$ (короткий импульс) и наибольшая при $\frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow 0$ (статическое нагружение).

Для такого рода сред существуют 2 предельные диаграммы сжатия: динамическая и статическая. В интервале между этими диаграммами есть семейство кривых сжатия, соответствующих различным скоростям деформации:

$$0 \leq \frac{d\varepsilon}{dt} \leq \infty.$$

Для тел, свойства которых характеризуются моделями, подобными представленной на рис. 4, площадь петли гистерезиса, а следовательно, и потери энергии за один цикл нагружения не зависят от скорости нагружения и разгружения, а зависят только от амплитуды деформации [6, 13–20]. Точную формулу петли гистерезиса в экспериментах сложно установить, так как расстояния между ветвями весьма малы. В то же время площадь петли гистерезиса довольно надежно может быть определена по формуле

$$\Delta\Pi = \alpha A^{n+1},$$

где α – амплитуда деформации; A, n – постоянные для данного материала величины, характеризующие его свойства.

Численное определение потерь энергии по данной формуле затруднено в связи с тем, что входящие в нее константы в каждом отдельном случае требуется устанавливать экспериментально. По выражению можно рассчитать потери энергии за один цикл нагружения или за один период колебаний конструкции. Так как в начале и в конце рассматриваемого периода кинетическая энергия конструкции равна нулю, то изменения полной энергии системы определяются изменением потенциальной энергии Π . При вычислении этого изменения необходимо учесть разницу между наибольшими отклонениями, которые условно называются амплитудами.

Потенциальная энергия в начале периода равна:

$$\Pi_i = \frac{cA_i^2}{2};$$

в конце периода –

$$\Pi_{i+1} = \frac{cA_{i+1}^2}{2};$$

изменение потенциальной энергии –

$$\Delta\Pi = \frac{c}{2}(A_i^2 - A_{i+1}^2),$$

где c – характеристика жесткости дорожной конструкции; A_i , A_{i+1} – амплитуда колебаний в начале и в конце рассматриваемого периода соответственно.

Для систем с вязким трением убывание амплитуд колебаний проходит по экспериментальному закону (рис. 5):

$$A = A_0 e^{-\Pi_z t} (\sin \omega t + \varphi_0), \quad (5)$$

где Π_z – коэффициент затухания колебаний.

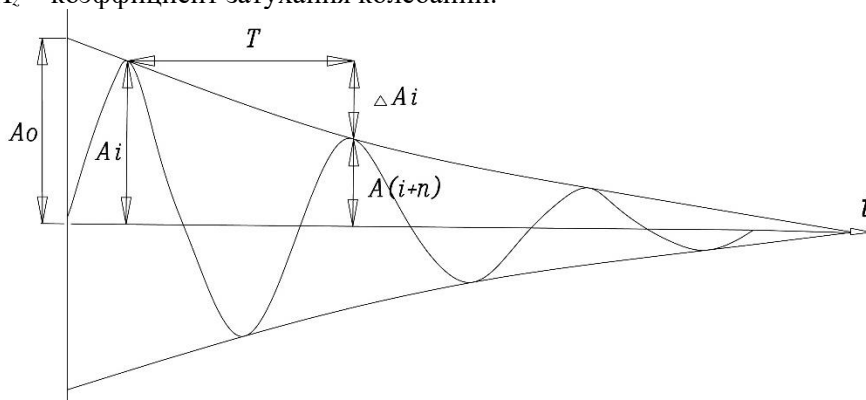


Рис. 5. Затухание колебаний для систем, обладающих внутренним неупругим сопротивлением (T – период колебаний, с)

Fig. 5. Damping of oscillations for systems with internal inelastic resistance (T – oscillation period, s)

Огибающие кривой процесса в данном случае определяются функциями

$$Y = \pm Y_0 e^{-\Pi_z t}.$$

Отношение амплитуд колебаний в начале и конце периода, согласно формуле (5), является постоянной величиной для данного колебательного процесса (рис. 5):

$$\frac{A_i}{A_{i+1}} = e^{\pi_z T}.$$

С учетом этого количество энергии рассеиваемой за один цикл или за один период колебаний

$$\Delta\Pi = \frac{cA_{i+1}^2}{2}(1 - e^{-2\pi_z T}).$$

Отношение потерь энергии за один цикл или один период нагружения к потенциальной энергии системы в начале периода определяет коэффициент рассеивания энергии

$$k_3 = \frac{\Delta\Pi}{\Pi_i} = 1 - e^{-2\pi_z T}. \quad (6)$$

Коэффициент затухания n_z связан с коэффициентом вязкого сопротивления h и модулем затухания Φ_z соотношением

$$n_z = \frac{h}{2m} = \frac{\Phi_z \omega^z}{2}, \quad (7)$$

где m – колебательная масса конструкции, кг; ω – круговая частота собственных колебаний, с^{-1} .

Модуль затухания Φ_z , входящий в это выражение, является для данного материала постоянной величиной, характеризующей его демпфирующие свойства.

Согласно исследованиям отечественных ученых [7, 8, 12], модуль затухания зависит от влажности материала, плотности и условий залегания, типа материала. Коэффициенты затухания для разных грунтов следующие:

Крупные и средней крупности пески.....	0,005/0,007
Мелкие и мелкие пылеватые пески.....	0,007/0,010
Твердые моренные супеси и суглинки	0,005/0,006
Глинистые плотные грунты.....	0,004/0,006
Рыхлые супеси.....	0,006/0,008
Слабые и в насыпи суглинки и глины.....	0,011
Водонасыщенные и влажные глинистые грунты.....	0,005

Колебательная масса дорожной конструкции зависит от плотности материала конструкции и радиуса штампа и может быть определена по формуле

$$m_{\text{гр}} = 0,4\rho\pi R^3, \quad (8)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3 ; R – радиус подошвы штампа, м.

Полная масса, участвующая в колебаниях, складывается из массы грунта и массы штампа с грузом:

$$m = m_{\text{гр}} + m_{\text{шт}}. \quad (9)$$

Круговая частота собственных колебаний системы «дорожная конструкция – штамп с грузом» определится по формуле

$$\omega_z = \sqrt{\frac{C_z F}{m}}, \quad (10)$$

где C_z – упругое равномерное сжатие, Н/м^3 ; F – площадь подошвы штампа, м^2 .

Упругое равномерное сжатие связано со статическим модулем упругости и площадью штампа следующим соотношением:

$$C_z = 0,885 \cdot \frac{E}{(1-\mu^2)} \frac{1}{\sqrt{F}}. \quad (11)$$

Период колебаний дорожной конструкции определится по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{C_z F}{m}}. \quad (12)$$

Подставив выражения (8)–(11) в выражение (7), получим:

$$P_z = \frac{\Phi_z \cdot 0,885 E \sqrt{F}}{(1-\mu^2) m}. \quad (13)$$

По данной формуле может быть вычислено значение коэффициента затухания колебаний P_z , входящего в выражение (6), для определения коэффициента рассеивания энергии.

Неизвестным в данном случае является период колебаний дорожной конструкции. Согласно исследованиям отечественных ученых [2, 5, 6], он изменяется от 0,022 до 0,059 с в зависимости от условий проведения опыта. Данные, полученные для песков и глинистых грунтов в условиях естественного залегания, приведены в таблице.

Значения амплитуды колебаний, коэффициента затухания и декремента затухания

The values for oscillation amplitude, damping coefficient and damping degeneracy

Грунт	Двойная амплитуда A_i , мкм	Декремент затухания	Коэффициент затухания $n_z = \Delta/T$	Темп затухания A_i / A_{i+1}
Песок	11–405	1,583–1,758	39,0	4,98–5,80
Глина	20–205	0,330	10,7	1,39

Анализ выражения (13) и предположения о зависимости коэффициента рассеивания энергии только от амплитуды деформации и независимости коэффициента от скорости нагружения позволяют установить, что основными факторами, определяющими величину вязкого сопротивления среды, а следовательно, и коэффициент рассеивания энергии, являются деформативные свойства дорожной конструкции и плотность материала покрытия.

Основными факторами, влияющими на деформативные свойства дорожной конструкции и плотность материала покрытия, становятся влажность материала и толщина дорожного покрытия.

Можно сделать вывод о возможности использования коэффициента рассеивания энергии в качестве характеристики прочностных свойств дорожной конструкции. Несмотря на простоту расчета коэффициента рассеивания энергии по зависимостям (7)–(13), его точное значение трудно определить теоретически.

Приведенные в литературе данные о значениях коэффициента затухания колебаний, модуля затухания и периода колебаний свидетельствуют, что эти показатели во многом обуславливаются видом материала покрытия, типом покрытия (жесткое, полужесткое, нежесткое), влажностью и плотностью материалов и модулем упругости дорожной конструкции.

В результате исследований установлена функциональная связь между частотой колебаний дорожной конструкции и ее модулем упругости, что позволяет сделать заключение о существовании подобной связи между модулем упругости и коэффициентом затухания колебаний. Для установления функциональной зависимости между модулем упругости и коэффициентом затухания колебаний необходимо провести дополнительные исследования по изучению характера этих зависимостей.

Выводы

1. При расчете сопротивления качению необходимо учитывать его составляющую, обусловленную деформацией конструкции. Величина этой составляющей зависит от модуля упругости дорожной конструкции.

2. Получена зависимость составляющей сопротивления качению, обусловленной деформацией дорожной конструкции. Эта зависимость позволяет повысить точность тягово-эксплуатационных расчетов для лесотранспорта на стадии проектирования лесовозной автомобильной дороги и может быть использована в целевой функции при вариантном проектировании.

3. Представлены коэффициенты рассеивания энергии, требующие уточнения в зависимости от модуля упругости дорожной конструкции.

4. Разработана и уточнена математическая зависимость составляющей сопротивления движению от прочности дорожной конструкции, позволяющая использовать сопротивление движению как косвенную характеристику прочности дорожной конструкции, а также как комплексный качественный показатель состояния проезжей части дороги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Автомобильные дороги: безопасность, экологические проблемы, экономика (российско-германский опыт) / под ред. В.Н. Луканина, К.-Х. Ленца. М.: Логос, 2002. 607 с.

Highways: Safety, Environmental Challenges, Economics (Russian-German Experience). Ed. by V.N. Lukanina, K.-X. Lentsa. Moscow, Logos Publ., 2002, 607 p. (In Russ.).

2. Бируля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
Birulya A.K. *Operation of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1966. 326 p. (In Russ.).

3. Буслаев А.П., Кузьмин Д.М. К вопросу об интеллектуальных системах в дорожном движении // Наука и техника в дорожной отрасли. 2006. № 2. С. 33–40.

Buslayev A.P., Kuzmin D.M. On the Issue of Intelligent Systems in Highway Traffic. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli = Advanced Science and Technology for Highways*, 2006, no. 2. pp. 33–40.

4. Васильев А.П., Дингес Э.В., Коганзон М.С. и др. Справочная энциклопедия дорожника. Т. 2: Ремонт и содержание автомобильных дорог / под ред. А.П. Васильева. М.: Информавтодор, 2004. 507 с.

Vasilyev A.P., Dinges E.V., Koganzon M.S. et al. *Reference Encyclopedia for Road-Worker. Vol. 2: Renovation and Maintenance of Highways*. Ed. by A.P. Vasilyev. Moscow, Informavtodor Publ., 2004. 507 p. (In Russ.).

5. Дрю Д.Р. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 1972. 424 с.

Dryu D.R. *Theory of Traffic Flows and Their Management*. Moscow, Transport Publ., 1972. 424 p. (In Russ.).

6. Иванов В.Н., Ерохов В.Н. Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10–13.

Ivanov V.N., Erokhov V.N. Road Parameters Influence on Fuel Consumption. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2014, no. 8, pp. 10–13. (In Russ.).

7. Калужский Я.А., Бегма И.В., Кисляков В.М., Филиппов В.В. Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1969. 136 с.

Kaluzhskiy Ya.A., Begma I.V., Kislyakov V.M., Filippov V.V. *Application of Public Service Theory to Road's Projecting*. Moscow, Transport Publ., 1969. 136 p. (In Russ.).

8. Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В. Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3-2(33). С. 272–275.

Kondrashova E.V., Skvortsova T.V. Improvement of Road Traffic Organization in the Forest Complex Transport Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* = Automation and Remote Control, 2008, no. 3-2(33), pp. 272–275. (In Russ.).

9. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения. М.: Академкнига, 2005. 279 с.

Kremenets Yu.A., Pecherskiy M.P., Afanasyev M.B. *Technical Equipment for Road Traffic Administration*. Moscow, Akademkniga Publ., 2005. 279 p. (In Russ.).

10. Луканин В.Н., Буслаев А.П., Яшина М.В. Автотранспортные потоки и окружающая среда. М.: Инфра-М, 2001. 646 с.

Lukanin V.N., Buslayev A.P., Yashina M.V. *Traffic Flows and Environment*. Moscow, Infra-M Publ., 2001. 646 p. (In Russ.).

11. Мытько Л.Р. Оценка транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильных дорог. Минск: Вуз-Юнити, 2001. 199 с.

Mytko L.R. *Evaluation of Transport-Operational Characteristics of Highways*. Minsk, Vuz-Yuniti Publ., 2001. 199 p. (In Russ.).

12. Сильянов В.В., Ситников Ю.М. Расчет скоростей движения при проектировании автомобильных дорог // Тр. МАДИ. 1974. Вып. 72. С. 47–66.

Silyanov V.V., Sitnikov Yu.M. Calculation of Driving Speed in Road Design. *Sbornik nauchnykh trudov of MADi*, 1974, vol. 72, pp. 47–66. (In Russ.).

13. Скворцов А.В., Поспелов П.И., Котов А.А. Геоинформатика в дорожной отрасли. М.: МАДИ (ГТУ), 2005. 250 с.

Skvortsov A.V., Pospelov P.I., Kotov A.A. *Geoinformatics in the Transport Sector*. Moscow, MADi (GTU) Publ., 2005. 250 p. (In Russ.).

14. Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.

Khomyak Ya.V. *Designing Road Networks*. Moscow, Transport Publ., 1983. 207 p. (In Russ.).

15. Эльвик Р., Мюсен А.Б., Ваа Т. Справочник по безопасности дорожного движения: пер. с норв. / под ред. В.В. Сильянова. М.: МАДИ (ГТУ), 2001. 754 с.

Elvik R., Myusen A.B., Vaa T. *Handbook of Road Safety*. Moscow, MADi (GTU) Publ., 2001. 754 p. (In Russ.).

16. Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Teterleva E.V., Burmistrov V.A., Mikheevskaya M.A., Chemshikova Y.M. Algorithm for Determining the Curvature of the Project Line of a Truck Haul Road and the Rate of Change in Its Curvature. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 1582–1589. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090528>

17. Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Pilyushina G.A., Burmistrov V.A., Kazachek M.N. Intelligent Design System for Logging Truck Roads. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, vol. 69, no. 8, pp. 89–95. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I8P211>


18. Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Bryukhovetsky A.N., Manukovsky A.Y., Vysotskaya I.A., Sapelkin R.S. A Linear Model of the Forest Transport Network and an Algorithm for Assessing the Influence of the Density of Points and the Length of Links in Developing Multi-Forested Areas. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 175–178. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I12P220>

19. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical Background of Road Landscape Zoning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 659, no. 1, art. 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012011>

20. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Levushkin D.M., Nikitin V.V., Mogutnov R.V., Sokol P.A. Feasibility Study of Geometrical Parameters of Wood Transportation Roads Including Prediction of Optimum Terms of Construction and Retrofitting Sequence. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, vol. 9, no. 6, pp. 2077–2083. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090635>

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

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 674.817

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-121-131

**Структурно-механические свойства
гидродинамически активированной древесной массы
в аддитивных технологиях****В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142)**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>***М.А. Баяндин**[✉], *канд. техн. наук, доц.;* *ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715)**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>***А.В. Намятов, ассистент;** *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>***В.А. Острякова, ст. лаборант;** *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1666-0324>*

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru[✉], namyatov2010@yandex.ru, karmen0703@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.22 / Одобрена после рецензирования 04.05.22 / Принята к печати 11.05.22

Аннотация. Аддитивные технологии методом 3D-печати являются перспективным направлением развития малоэтажного домостроения. Для этого используют различные материалы. Проведено исследование возможности применения в качестве материала для 3D-печати гидродинамически активированной древесной массы. Измельченная древесина в процессе активации под воздействием эффекта кавитации изменяет свое физико-химическое состояние. Данная древесная масса представляет собой твердообразную дисперсную систему, свойства которой зависят от влажности. Такую древесную массу можно транспортировать по трубопроводам, структурообразование происходит в процессе удаления влаги за счет возникновения аутогезионных взаимодействий между древесными частицами без использования адгезивов. Полученный таким образом материал имеет достаточно высокие прочность и водостойкость, что послужило предпосылкой для использования активированной древесной массы в аддитивных технологиях. Формирование изделия методом 3D-печати происходит путем послойного нанесения материала с определенными временными интервалами. Обязательным условием при этом является обеспечение стабильной формы и однородности структуры. Поэтому были выполнены исследования по определению предела ползучести древесной массы, показывающего величину напряжений, при превышении которых начинается интенсивное пластическое деформирование материала (течение). Данное исследование проводилось по методике академика П.А. Ребиндера с использованием конического пластометра. Изученный показатель существенно зависит от влажности массы. При снижении влажности предел ползучести значительно возрастает. Полученная зависимость является основой для научно-обоснованного определения толщины наносимых

слоев и временных промежутков между нанесениями. Однородность структуры в межслойной зоне определяет прочность всего изделия и обеспечивается влажностью в зоне контакта не менее 400 %. Создать высокую влажность в зоне контакта при низкой средней влажности массы можно за счет обработки СВЧ-излучением. В результате такой обработки происходит перераспределение влажности по толщине слоя. На поверхности она увеличивается, а в центре – снижается.

Ключевые слова: влажность древесной массы, однородность древесной массы, пластиномер, предел ползучести древесной массы, аддитивные технологии, экструдирование смеси, аутогезия, пьезотермическое воздействие, 3D-печать

Благодарности: Данный проект поддержан за счет средств гранта № 20-48-240001, предоставленного РФФИ, правительством Красноярского края и Краевым фондом науки.

Для цитирования: Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Острякова В.А. Структурно-механические свойства гидродинамически активированной древесной массы в аддитивных технологиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 121–131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>

Original article

Structural and Mechanical Properties of Hydrodynamically Activated Wood Pulp in Additive Technologies

Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Mihail A. Bayandin[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

Alexey V. Namyatov, Teaching Assistant;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>

Valentina A. Ostryakova, Senior Laboratory Assistant;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1666-0324>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk 660037, Russian Federation; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru[✉], namyatov2010@yandex.ru, karmen0703@yandex.ru

Received on January 28, 2022 / Approved after reviewing on May 04, 2022 / Accepted on May 11, 2022

Abstract. One of the techniques of additive technologies is 3D printing. It is a perspective direction in the development of low-rise housing construction. The process of 3D printing can be performed with various materials. Although this study investigates the possibility of applying hydrodynamically activated wood pulp. A fragmented wood in the process of activation changes physical and chemical properties because of the cavitation effect. Such fragments in the form of the activated pulp are a solid dispersed system, whose properties depend on humidity. The activated pulp mass is created by moisture elimination, and it can be transported through pipelines. The structure is formed in the process of self-adhesion, without any adhesives, by the appearance of autogenous interactions between the wood particles. The obtained material has a sufficiently high strength and water resistance, which are the prerequisites for the use of activated wood pulp in additive technologies. The 3D printed products are constructed by applying some material in layers at certain time intervals. The main requirements are a steady shape and a homogeneity of the structure. Therefore,



the limit of creep rate for the pulp mass was determined that is a yield tensile stress point, above which the material (flow) undergoes an intensive plastic deformation. In this study, a conical plastometer was used according to the method of Academician P.A. Rebinder. The measured parameter depends significantly on the humidity of the pulp. There found an inverse relationship between the humidity and the creep limit. The obtained dependence is fundamental for determination of the thickness of applied layers and the time intervals between applications. The homogeneity of the structure in the interlayer section determines the strength of the entire product. It is obtained when the humidity level is greater than 400 % in the contact area. The high humidity level at the contact area with the low average humidity of the material can be created by microwave radiation treatment. Thus, the moisture is distributed across the thickness of the layer. The treatment also increases the humidity level on the surface and reduces it in the center of the material.

Keywords: humidity of wood pulp, homogeneity of wood pulp, plastometer, creep limit, additive technologies, mixture extrusion, self-adhesion, piezothermic influence, 3D printing

Acknowledgments: This project is supported by grant No. 20-48-240001 provided by the RFBR, the government of Krasnoyarsk Krai and Regional Funds of Science.

For citation: Ermolin V.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. Structural and Mechanical Properties of Hydrodynamically Activated Wood Pulp in Additive Technologies. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 121–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>

Введение

Развитие аддитивных технологий является одним из приоритетов современной науки. Они находят применение в разных областях. Одна из них – домостроение методом 3D-печати. В этом направлении уже достигнуты позитивные результаты, в особенности при использовании композиций на основе цемента. В большинстве случаев в качестве основы применяют различные виды цементов с добавлением упрочняющих добавок, пластификаторов и ускорителей твердения [10, 13, 18]. Известно 2 главных подхода формирования строительных изделий. Наиболее широкое распространение получил метод 3D-печати материалов (ME3DP) путем экструдирования смеси под давлением [17]. Наравне с этим активно изучается струйный метод (BJ3DP) – послойное нанесение связующего и минеральных компонентов смеси [17]. В работе [12] для снижения материалоемкости и теплопроводности строительных изделий предлагается формирование их ячеистой структуры. В целом использование смесей на основе минеральных вяжущих в современных условиях сдерживает высокая энергоемкость производства сырья и материалов для 3D-печати и готовых строительных решений. Большой интерес представляет использование в таких технологиях растительного сырья. Это является шагом к развитию «зеленой» экономики и снижению углеродного следа.

В настоящее время есть опыт использования растительных волокон в качестве наполнителя в композициях для 3D-печати объемных деталей и форм. В полимерную матрицу в качестве армирующего элемента вносятся древесные волокна [11]. Так, в работе [16] предлагается применять для 3D-печати смесь полимолочной кислоты и полигидроксиалканоата, которая выступает в качестве матрицы. Содержание древесных волокон находится в диапазоне от 10 до 20 % массовых частей. В исследовании [8] приводятся данные о том,

что продукт марки Lauwoo может содержать до 40 % (по массе) древесного волокна, однако данные материалы используются в том числе в виде нити диаметром до 3 мм, что неприемлемо при формировании крупногабаритных строительных изделий.

Во всех отмеченных случаях структурообразование материала основано на применении связующих веществ. Это создает целый комплекс проблем на стадии эксплуатации и последующей утилизации этих материалов.

Перспективным является направление получения материалов без связующих веществ, структурообразование в таком случае происходит за счет аутогезионных взаимодействий между структурными компонентами. Направление активно развивается в области производства древесных плит без связующих веществ. Это достигается предварительной активацией древесного сырья. Положительные результаты дает паро-взрывной гидролиз, при котором древесные частицы подвергаются разрушению за счет быстрых изменений давления (декомпрессии) и температуры процесса. Данные воздействия приводят к разрушению легкогидролизуемых полисахаридов и деградации лигнина, что сопровождается разрушением клеточной структуры древесины и увеличением количества свободных функциональных групп [4]. Это позволяет получать методом горячего прессования древесные пластики с высокими механическими свойствами [21]. Но предлагаемые решения являются технически трудно реализуемыми и не дают возможности производить материалы малой плотности без использования связующих веществ.

Другим способом активации являются химические воздействия на лигноуглеводную матрицу древесинного вещества. Известен целый спектр химических веществ, которые могут воздействовать на древесинное вещество, например органические кислоты, щелочи и соли [2, 3, 6, 20]. При таких воздействиях происходит частичная химическая деструкция компонентов клеточной стенки, что ведет к увеличению количества реакционноспособных групп, которые при последующем пьезотермическом воздействии образуют различные физические связи, а по мнению ряда исследователей [6, 20], – химические. Данный способ получения пластиков не нашел широкого распространения ввиду высокой энергоемкости и сложности технологии.

У исследователей вызывает интерес биотехнологический подход получения древесных прессованных композиционных материалов, базирующийся на микробиологическом (энзиматическом) способе биоактивации природных полимеров древесины [19]. При воздействии микроорганизмов, ферментов и дереворазрушающих грибов происходит направленная частичная деструкция компонентов клеточной стенки [14]. Под действием ферментов дереворазрушающих грибов расщеплению подвергаются в основном лигнин и гемицеллюлозы, а целлюлозные фибриллы практически сохраняют исходную структуру. В лигнине и полисахаридах образуются активные центры и реакционноспособные группы – фенольные, карбонильные, карбоксильные, аминогруппы, гидроксильные и другие, которые при последующем прессовании и воздействии высоких температур в местах контакта древесных частиц образуют прочные химические связи [7, 15]. Следует отметить, что в перечисленных способах активации формирование структуры древесного материала происходит только в условиях пьезотермических воздействий.

Большие перспективы открывает гидродинамическая активация древесины. Измельченную древесину (опилки) замачивают в воде и затем обрабатывают в гидродинамическом диспергаторе. В процессе обработки вследствие эффекта кавитации происходит фибриллирование древесных частиц, т. е. частичное расслоение клеточных стенок на отдельные пучки фибрилл. В результате образуются новые межфазные поверхности с активными функциональными группами, которые ранее участвовали в формировании надмолекулярных структур древесинного вещества. Вода гидратирует эти группы. Полученной древесной массе придают требуемую форму (например, форму плиты) и производят сушку конвективным или кондуктивным способом. При удалении воды между функциональными группами образуются межмолекулярные связи (в основном водородные) между соседними частицами. За счет этого происходит структурообразование материала без использования связующих веществ. Как показывают исследования, полученные таким образом плиты по своим механическим свойствам, при сопоставимой плотности, не уступают широко известным аналогам: ДСтП, MDF, ДВП – а по водостойкости даже превосходят их [5].

Активированная древесная масса может быть использована для создания изделий способом 3D-печати. Объективные предпосылки для этого следующие. Древесная масса представляет собой твердообразную дисперсную систему, вязкость и пластичность которой существенно зависят от влажности. Данный материал без особых сложностей транспортируется по трубопроводам. При формовании экструзионным методом с использованием различных насадок возможно придать древесной массе любую желаемую форму. Структурообразование происходит, как было отмечено выше, благодаря физико-химическому взаимодействию между древесными частицами в результате удаления влаги. Высыхание осуществляется как за счет пьезотермических воздействий (горячее прессование), так и в процессе выдержки на открытом воздухе. При этом физическая сущность происходящих процессов остается одинаковой. Изменяются только их интенсивность и свойства получаемого материала, в частности его плотность и, соответственно, прочность. При высыхании на открытом воздухе без предварительного уплотнения плотность материала при влажности 10 % получается порядка 200 кг/м³. Прочность при сжатии составляет 0,82 МПа, а коэффициент теплопроводности – 0,039 Вт/(м·К) [8]. При длительном вымачивании в воде материал сохраняет свои свойства.

Цель работы – доказательство принципиальной возможности применения гидродинамически активированной древесной массы для формирования однородной структуры материала аддитивным методом.

Объекты и методы исследования

Создание пространственных деталей методом 3D-печати происходит путем послойного нанесения материала с некоторыми временными интервалами. При этом обязательным условием является получение определенной стабильной формы и однородной структуры.

При послойном формировании объема нагрузка на нижележащие слои будет постепенно возрастать. Учитывая, что древесная масса не является иде-

ально упругим телом, ее деформации будут развиваться во времени в зависимости от разных факторов. Для прогнозирования деформаций формируемого изделия необходимо изучение реологических свойств активированной древесной массы.

Применительно к аддитивным технологиям важной характеристикой активированной древесной массы является предел ползучести. Он показывает предельные напряжения, при превышении которых начинается интенсивное пластическое деформирование материала (течение). Это значение говорит о допустимой нагрузке, которую можно приложить к нижележащему слою без его деформирования. Величина данной нагрузки зависит от плотности массы и толщины слоя. Нахождение предела ползучести создает основу для научно-обоснованного определения толщины слоев.

Изучение предела ползучести активированной древесной массы проводили по методике академика П.А. Ребиндера [9] с использованием конического пластометра. При исследовании фиксировали кинетику погружения конуса в массу, исключали снижение влажности массы. Наблюдения прекращали при неизменности глубины погружения в течение 2 сут. Продолжительность наблюдений, как правило, не превышала 9 сут. По полученной таким образом глубине погружения конуса рассчитывали предел ползучести.

Важным условием при формировании объема изделия аддитивным способом является однородность структуры материала в межслойной зоне. Это во многом предопределяет механические свойства материала и, соответственно, изделия в целом. Структурообразование активированной древесной массы представляет собой образование взаимодействий между межфазными поверхностями соседних частиц в процессе высыхания. Вода в данной дисперсной системе является важным компонентом процесса структурообразования. При удалении воды из древесной массы во время сушки вследствие возникновения сил капиллярной контракции [1] происходит сближение межфазных поверхностей и в конечном итоге образуются межмолекулярные взаимодействия. Ранее, при разработке технологии получения плит без связующих из активированной древесной массы, было отмечено, что их свойства очень сильно зависят от начальной влажности массы. Минимальная влажность массы, при которой в процессе высыхания может образоваться связанная структура материала, хотя и с низкими механическими показателями, составляет $\approx 120\%$ [5]. Наибольшая прочность достигается при начальной влажности более 250% .

При определении влажности активированной древесной массы применительно к аддитивным технологиям необходимо учесть следующие особенности. Массу транспортируют по трубопроводам. С увеличением ее влажности эта задача упрощается. Слои массы при формировании объема изделия наносятся через интервалы времени. Соответственно, верхняя поверхность последнего слоя некоторое время находится в контакте с окружающим воздухом. В результате испаряется вода и снижается влажность поверхностного слоя массы. При определенных условиях образования связанной структуры в межслойной зоне не произойдет. Поэтому было выполнено исследование влияния влажности в зоне контакта на межслойное взаимодействие.

Исследование проводили следующим образом. Из механоактивированной древесной массы, имеющей определенную влажность, формовали парные

заготовки размером $120 \times 120 \times 10$ мм. Их накладывали друг на друга без прижатия и выдерживали в помещении лаборатории до достижения ими влажности порядка 12 %. В качестве контрольных из древесной массы влажностью 410 % формовали заготовки размером $120 \times 120 \times 20$ мм, которые также выдерживали в лаборатории. Затем заготовки раскраивали на образцы размером $50 \times 50 \times 20$ мм и по стандартной методике определяли для них предел прочности на разрыв перпендикулярно плоскости контакта слоев.

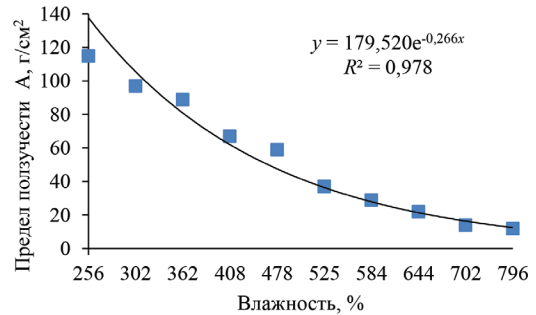
Влажность массы оказывает сильное и при этом противоположное влияние на процесс формирования изделий аддитивным методом. Для получения однородной структуры нужна высокая влажность, а для снижения ползучести, наоборот, – низкая. При этом высокая влажность массы увеличит продолжительность выдержки изделия для формирования его структуры. Поэтому необходим поиск путей снижения влажности массы, но при обеспечении однородной структуры в межслойной зоне. Перспективным направлением в решении этого вопроса является перераспределение влажности по толщине последнего слоя за счет ее увеличения на поверхности и снижения в центре, что позволило бы обеспечить необходимую влажность в зоне контакта при меньшей средней влажности. Как показал проведенный анализ, этого можно достичь предварительной обработкой последнего слоя СВЧ-излучением. В процессе такой обработки во влажных телах образуется избыточное парогазовое давление – вода может перемещаться из центральных слоев к поверхности.

Для проверки выдвинутого предположения были проведены предварительные исследования по следующей методике. Из активированной древесной массы определенной влажности формовали образцы размером $100 \times 100 \times 20$ мм, что имитировало слои, которые последовательно наносятся при формировании изделия. Образцы обрабатывали в микроволновой печи мощностью 600 Вт в течение 5 мин. После этого из образцов быстро вырезали слои толщиной 2 мм, у этих слоев устанавливали влажность сушильно-весовым способом. Слои вырезали с поверхности образцов, $\frac{1}{4}$ толщины и центральной части.

Результаты исследования и их обсуждение

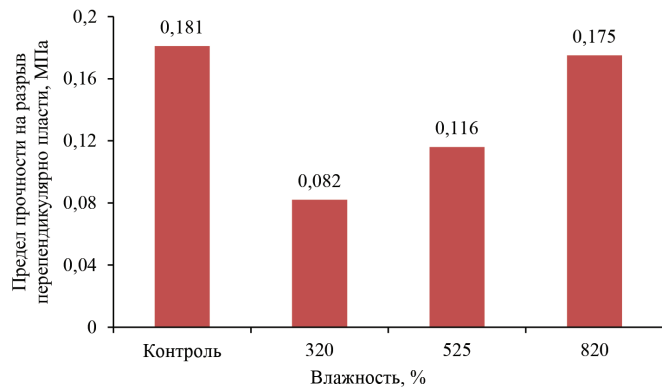
В результате проведенного исследования была получена зависимость предела ползучести активированной древесной массы от ее влажности (рис. 1). Как следует из приведенных на рис. 1 данных, реологические свойства древесной массы значительно зависят от ее влажности. При снижении влажности предел ползучести существенно возрастает. При формировании изделий по аддитивной технологии нагрузка на нижележащие слои со временем постепенно увеличивается. Одновременно с этим снижается влажность и, соответственно, растет предел ползучести. Кроме того, снижение влажности массы уменьшает ее плотность и, следовательно, нагрузку. Это создает предпосылки для создания формостабильных конструкций по такой технологии. Сопоставление предела ползучести, плотности массы и их зависимостей от влажности показывает, что при соблюдении определенных условий данный материал может использоваться в малоэтажном домостроении методом 3D-печати.

Рис. 1. Зависимость предела ползучести древесной массы от влажности
Fig. 1. Correlation between creep limit of wood pulp and humidity



Исследование влияния влажности древесной массы на формирование однородных структур в зоне контакта слоев показало следующее. При растяжении образцов разрушение всегда происходит по межслоевой зоне. Это говорит о том, что процесс структурообразования в этой зоне имеет отличие по сравнению с происходящим в объеме слоя. С увеличением влажности прочность на разрыв возрастает, но при этом она всегда ниже, чем у контрольных образцов (рис. 2). Следует отметить, что прочность на разрыв во многих случаях, в частности применительно к домостроению, не является критическим показателем. Поэтому, по нашему мнению, можно рекомендовать уровень влажности массы в зоне контакта слоев 400 % и более.

Рис. 2. Влияние влажности массы в зоне контакта на предел прочности на растяжение перпендикулярно пласти
Fig. 2. Correlation between humidity of wood pulp in the contact zone and tensile strength applied perpendicular to the planes



Результаты анализа перераспределения влажности по толщине образцов из активированной древесной массы в результате СВЧ-обработки приведены на рис. 3. Из полученных данных следует, что СВЧ-обработка позволяет при неизменной средней влажности образцов увеличить влажность поверхностных слоев и снизить – центральных. Рост влажности в поверхностной зоне создает благоприятные условия для взаимодействия между слоями, позволяет снизить среднюю влажность массы в слоях и, как следствие, увеличить предел ползучести и уменьшить продолжительность процесса сушки. Поэтому СВЧ-обработка применительно к аддитивным технологиям является перспективным направлением и требует более глубокого изучения. Как нам представляется, такая обработка совместима с технологией 3D-печати. Необходимое оборудование может быть сблокировано с печатающей головкой. В настоящее время уже есть опыт использования СВЧ-обработки для интенсификации процессов твердения бетона в домостроении методом 3D-печати [17].

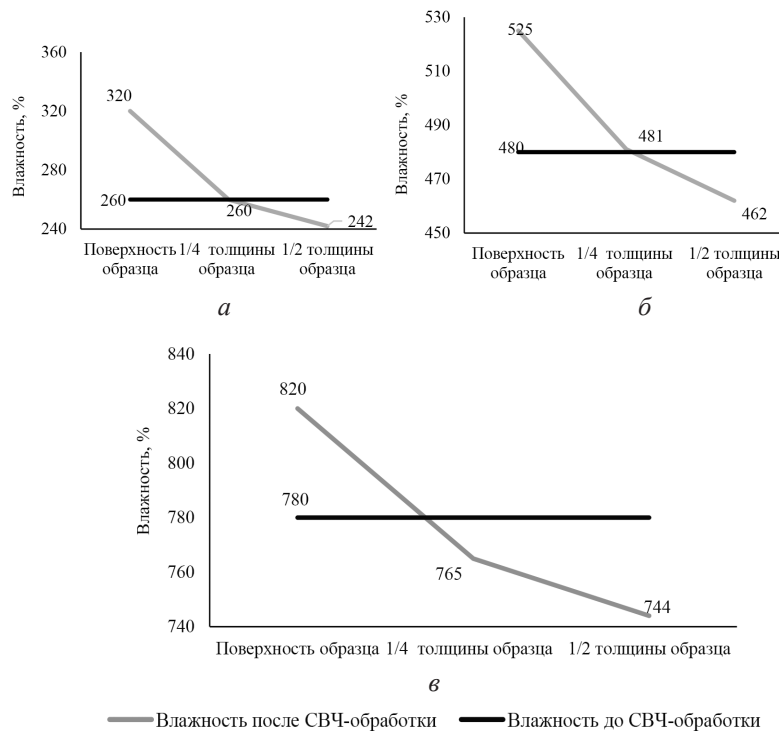


Рис. 3. Изменение влажности древесной массы по толщине образцов в результате СВЧ-обработки при начальной влажности массы, %: *a* – 320; *b* – 525; *v* – 820

Fig. 3. Change in humidity of wood pulp by layer thickness as a result of microwave radiation treatment with the initial humidity (%): *a* – 320; *b* – 525; *v* – 820

Выводы

1. Проведенное исследование показывает принципиальную возможность использования гидродинамически активированной древесной массы для создания объемных изделий по аддитивной технологии, в частности в малоэтажном домостроении методом 3D-печати.

2. Полученные зависимости предела ползучести активированной древесной массы от ее влажности являются научной основой для определения толщины наносимых слоев и временных интервалов между нанесениями.

3. Для достижения однородной структуры в межслойной зоне, обеспечивающей высокую прочность, влажность древесной массы в зоне контакта должна быть не менее 400 %.

4. Увеличение влажности древесной массы в зоне контакта, что необходимо для обеспечения высоких механических свойств материала, возможно за счет предварительной СВЧ-обработки. Это позволит снизить исходную влажность древесной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аведиков А.С., Остриков М.С., Дибров Г.Д. Об усадочном напряжении в дисперсных структурах // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163, № 5. С. 1185–1188.

Avedikov A.S., Ostrikov M.S., Dibrov G.D. Contraction Stress in Dispersed Structures. *Doklady Akademii nauk USSR. Chemistry Series*, 1965, vol. 163, no. 5, pp. 1185–1188. (In Russ.).

2. Артёмов А.В., Буриндин В.Г., Савиновских А.В. Влияние карбамида на физико-механические свойства пластика на основе сосновых опилок // Вестн. технол. ун-та. 2021. Т. 24, № 5. С. 35–39.

Artemov A.V., Buryndin V.G., Savinovskikh A.V. The Influence of Carbamide on the Physico-Mechanical Properties of Plastic Made of Pine Sawdust. *Vestnik of Kazan National Research Technological University*, 2021, vol. 24, no. 5, pp. 35–39. (In Russ.).

3. Базарнова Н.Г., Маркин В.И., Катраков И.Б., Колосов П.В., Калюта Е.В., Чепрасова М.Ю. Методы получения лигноуглеводных композиций из химически модифицированного растительного сырья // Рос. хим. журн. 2011. Т. 55, № 1. С. 4–9.

Bazarnova N.G., Markin V.I., Katrakov I.B., Kolosov P.V., Kalyuta E.V., Cheprasova M.Yu. Methods for Obtaining Lignocarbhydrate Compositions from Chemically Modified Plant Raw Materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2011, vol. 55, no. 1, pp. 4–9. (In Russ.).

4. Ефремов А.А. Влияние условий термокаталитической активации древесины осины на состав водорастворимых продуктов // Химия природ. соединений. 1995. № 6. С. 20–25.

Efremov A.A. Influence of the Conditions for Thermocatalytic Activation of Aspen Wood on the Composition of Water-Soluble Products. *Khimiya prirodnikh soyedineniy = Chemistry of Natural Compounds*, 1995, no. 6, pp. 20–25. (In Russ.).

5. Казитцин С.Н. Получение древесных плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 132 с.

Kazitsin S.N. *Production of Chipboards Without Binders from Mechanically Activated Wood Particles*: Cand. Eng. Sci. Diss. Ekaterinburg, 2017. 132 p. (In Russ.).

6. Карасев Е.И., Киселев И.Ю., Мерсов Е.Д., Киселева Г.В. Водостойкость древесноволокнистых плит. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1986. 32 с.

Karasev E.I., Kiselev I.Yu., Mersov E.D., Kiseleva G.V. *Water Resistance of Wood Fibreboards*. Moscow, VNIPIEIsesprom Publ., 1986. 32 p. (In Russ.).

7. Кондрашенко В.И., Тарарушкин Е.В., Горшина Е.С., Кесарийский А.Г. Биопластики – древесные композиционные материалы, получаемые методами биотехнологии // Вестн. ДонНАСА. 2012. № 1(93). С. 17–24.

Kondrashenko V.I., Tararushkin E.V., Gorshina E.S., Kesariyskiy A.G. Bioplastics – Wood Composites Obtained by Biotechnology Methods. *Vestnik of DonNACA*, 2012, no. 1(93), pp. 17–24. (In Russ.).

8. Намятов А.В., Баяндин М.А., Казитцин С.Н., Ермолин В.Н. Исследование свойств плит малой плотности из механоактивированных древесных частиц без использования связующих веществ // Строение, свойства и качество древесины – 2018: материалы VI Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвящ. 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам лесоведения, Красноярск, 10–16 сент. 2018 г. Новосибирск: СО РАН, 2018. С. 149–151.

Namyatov A.V., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Ermolin V.N. Investigation of the Properties of Low-Density Boards Made of Mechanically Activated Wood Particles Without Usage of Binders. *Structure, Properties and Quality of Wood – 2018: Proceedings of the 6th International Symposium named after B.N. Ugolev, dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordinating Council on Modern Problems of Wood Science. Krasnoyarsk, September 10-16, 2018*. Novosibirsk, SB RAS, pp. 149–151. (In Russ.).

9. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избр. тр. М.: Наука, 1979. 384 с.

Rebinder P.A. *Surface Effects in Dispersed Systems. Physico-Chemical Mechanics. Selected Works*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 384 p. (In Russ.).

10. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive Manufacturing of Concrete in Construction: Potentials and Challenges of 3D Concrete Printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
11. Correa D., Papadopoulou A., Guberan C., Jhaveri N., Reichert S., Menges A., Tibbits S. 3D printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 106–116. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0022>
12. Feng P., Meng X., Chen J.-F., Ye L. Mechanical Properties of Structures 3D Printed with Cementitious Powders. *3D Concrete Printing Technology*, Elsevier, 2019, pp. 181–209. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00009-9>
13. Ferretti E., Moretti M., Chiusoli A., Naldoni L., de Fabritiis F., Visonà M. Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 3, p. 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743>
14. Forss K. Biotechnology in the Forest Industry. *Bioconversion of Plant Raw Material by Microorganisms: Proceedings of the 5th Finnish-Soviet Seminar*. Helsinki, University of Helsinki, 1983, pp. 13–21.
15. Kirk T.K., Shimada M. Lignin Biodegradation: The Microorganisms Involved and the Physiology and Biochemistry of Degradation by White-Rot Fungi. *Biosynthesis and Biodegradation of Wood Components*, Elsevier, 1985, pp. 579–605. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-347880-1.50025-8>
16. Le Duigou A., Castro M., Bevan R., Martin N. 3D Printing of Wood Fibre Biocomposites: From Mechanical to Actuation Functionality. *Materials and Design*, 2016, vol. 96, pp. 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>
17. Min K.-S., Park K.-M., Lee B.-C., Roh Y.-S. Chloride Diffusion by Build Orientation of Cementitious Material-Based Binder Jetting 3D Printing Mortar. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 23, p. 7452. <https://doi.org/10.3390/ma14237452>
18. Perrot A., Rängeard D., Pierre A. Structural Built-Up of Cement-Based Materials Used for 3D Printing Extrusion Techniques. *Materials and Structures*, 2016, vol. 49, no. 4, pp. 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
19. Unbehaun H., König S., Spindler D., Kerns G. Enzymatic Modification of Lignocellulosic Substances for the Production of Fiberboards. *Moscow University Chemistry Bulletin*, 2008, vol. 63, no. 2, pp. 126–130. <https://doi.org/10.3103/S002713140802017X>
20. Velásquez J.A., Ferrando F., Salvadó J. Binderless Fiberboard from Steam Exploded Miscanthus Sinensis: The Effect of a Grinding Process. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2002, vol. 60, no. 4, pp. 297–302. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0304-2>
21. Velásquez J.A., Ferrando F., Salvadó J. Binderless Fiberboard from Steam Exploded Miscanthus Sinensis: Optimization of Pressing and Pretreatment Conditions. *Wood Science and Technology*, 2003, vol. 37, no. 3-4, pp. 279–286. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0186-4>

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

Научная статья

УДК 674.02

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-132-145

Морфологический анализ и оптимизация технологического процесса продольного раскря круглых лесоматериалов

А.С. Торопов¹, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-2505>

В.Е. Бызов², канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2078-5226>

¹Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий-Эл, Россия, 424000; Toropov_A_S@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; marana@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.01.22 / Одобрена после рецензирования 20.04.22 / Принята к печати 24.04.22

Аннотация. Пиломатериалы хвойных пород находят широкое применение в строительстве. Однако в последнее время размерно-качественный состав круглых лесоматериалов для изготовления пиломатериалов значительно ухудшился. Количество пиловочных бревен диаметром 14–20 см составляет только до 50 % от общего количества сырья, поступающего на лесопильные предприятия. Кроме того, круглые лесоматериалы больших диаметров все чаще поражаются различными видами гнилей, как правило, ядровыми гнилями. Таким образом, необходимо бережно использовать пиловочное сырье. Встает задача интенсификации процесса раскря круглых лесоматериалов. Это особенно важно при раскря круглых лесоматериалов с присутствием ядровой гнили. Решение задачи возможно при применении современных технологических процессов раскря и специализированного оборудования. Для выбора технологической схемы раскря и конструктивных решений установок для продольного раскря круглых лесоматериалов применен метод морфологических исследований. Полнота морфологической таблицы определяется суммой объектов понятий всех признаков и оценивается результативностью получения эффективных технологических и конструктивных решений. С использованием морфологического метода разработана методика систематизации поиска. В результате патентного поиска выявлены основные охраняемые и опубликованные заявочные документы, касающиеся программ продольного раскря круглых лесоматериалов. С учетом установленных закономерностей рассмотрены технологические схемы продольного раскря круглых лесоматериалов и конструктивные схемы оборудования для раскря. В целях повышения производительности оборудования для продольного раскря круглых лесоматериалов предложена новая программа раскря. Программа защищена патентом Российской Федерации. Оценка возможностей осуществления технологического процесса продольного раскря круглых лесоматериалов выполнена путем анализа целевых функций затрат на организацию производства, производительности в смену и качественного выхода продукции раскря. Предложенная методика выбора направлений интенсификации продольного раскря круглых лесоматериалов позволяет определять эффективные технологические и технические решения на предпроектной стадии.

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, интенсификация продольного раскря лесоматериалов, морфологические исследования, технологическая схема раскря, конструктивные решения оборудования, оптимизация технологического процесса раскря

Для цитирования: Торопов А.С., Бызов В.Е. Морфологический анализ и оптимизация технологического процесса продольного раскроя круглых лесоматериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 132–145. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-132-145>

Original article

Morphological Analysis and Optimization of Technological Process for Rip Cutting of Round Timber

*Aleksandr S. Toropov*¹, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-2505>

Viktor E. Byzov^{2✉}, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2078-5226>

¹Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; Toropov_A_S@mail.ru

²St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; mapana@inbox.ru✉

Received on January 14, 2022 / Approved after reviewing on April 20, 2022 / Accepted on April 24, 2022

Abstract. Coniferous sawn timber is extensively used in construction. However, the dimensional and qualitative composition of the round timber for lumber production has recently deteriorated significantly. The number of sawn logs with a diameter of 14–20 cm represents barely 50 % of the total supply of raw materials for sawmills. Besides that, large-diameter logs frequently have some signs of decay, which is mostly heartwood rot. Thus, the sawlog must be handled with caution. The problem is to intensify the sawing process, especially when logs have a presence of heartwood rot. This is possible to achieve with the implementation of modern technological sawing processes and specified equipment. A method of morphological research is used to select flowsheet diagrams of sawing and construction solutions for rip cutting equipment. The completeness of the morphological table is determined by the sum of all properties of the concept objects and is evaluated by obtaining effective technological and constructive solutions. According to the morphological method, a procedure of search systematization is developed. The patent search identified the main protective and published application documents concerning programs about ripping machines for round timber. The flowsheet diagrams for rip cutting of round timber and operational schemes for the equipment are adjusted according to the discovered regularities. A new sawing program is proposed in order to improve the efficiency of the equipment. It was licensed under a national patent of the Russian Federation. The evaluation of the possibility of implementing the technological process is made by analyzing the target costs for the production arrangement, the production rate per shift, and the quality of the final products. The proposed method for selecting directions to intensify the rip cutting of round timber gives the possibility to determine the effective technological and technical decisions at a project's preliminary problem-solving stage.

Keywords: round timber, intensification of timber rip cutting, morphological studies, flowsheet diagram of sawing, construction solution for equipment, sawing optimization

For citation: Toropov A.S., Byzov V.E. Morphological Analysis and Optimization of Technological Process for Rip Cutting of Round Timber. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 132–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-132-145>

Введение

Для изготовления элементов несущих строительных конструкций применяют пиломатериалы хвойных пород. Согласно требованиям нормативно-технической документации, присутствие гнили в пиломатериалах для строительства не допускается. В то же время качество круглых лесоматериалов хвойных пород постоянно ухудшается: при заготовке древесины они попадают в разряд низкокачественных из-за наличия гнили, которая поражает ядровую древесину и выходит на один или оба торца сортимента. Такие лесоматериалы используют для производства технологической щепы или как дровяную древесину.

В круглых лесоматериалах, пораженных ядровой гнилью, вокруг зоны поражения находится заболонная древесина, обладающая высокими прочностными характеристиками. Она используется нерационально. Следовательно, требуется разработка новых технологических процессов изготовления элементов строительных конструкций из древесины. Также необходимо разработать специализированное оборудование для продольного раскроя круглых лесоматериалов.

Цель исследования – проведение морфологического анализа для оптимизации технологической схемы продольного раскроя низкокачественных круглых лесоматериалов.

Объекты и методы исследования

Морфологический анализ – метод целенаправленного поиска описаний решений – разработан швейцарским ученым Ф. Цвикки в 1942 г. Основным принципом такого анализа является анализ старых систем и синтез из их элементов новых систем [5]. Сущность морфологических исследований функциональных систем заключается в том, что на базе построенной морфологической таблицы рассматриваются все возможные варианты, вытекающие из закономерностей строения (морфологии) рассматриваемой системы (стадия синтеза). При этом синтезируются как известные, так и новые варианты, которые при простом переборе могут быть упущены. Идея метода – уйти от привычных представлений, инертности мышления и расширить область поиска новых технологий и конструкций для совершенствования конкретной функциональной системы.

Морфологический анализ относится к многоаспектной классификации и заканчивается построением морфологической таблицы, которая одновременно является классификационной таблицей. По своему содержанию и объему морфологическая таблица имеет значительные преимущества по сравнению с известными схемами классификации, так как число вариантов технологических и конструктивных решений, предлагаемых такой таблицей, намного выше. Причем морфологическая таблица постоянно и достаточно быстро пополняется и совершенствуется путем открытия новых признаков и их значений, а ее структура позволяет кодировать решения с целью автоматизированного хранения информации и поиска новых решений на этапе проектирования технологического процесса. Применение метода морфологического анализа и синтеза наиболее эффективно при решении конструкторских задач общего плана (проектирование новых машин и механизмов, поиск новых компоновочных решений).

Продольный раскрой представляет собой наиболее распространенный способ переработки круглых лесоматериалов. Он осуществляется на лесопильных предприятиях с различными объемами переработки древесины. При рассмотрении функциональной системы «продольный раскрой круглых лесоматериалов» появляется возможность использования системного функционального подхода, который реализуется при построении морфологических таблиц. Основным источником информации является патентная документация. Целью данного этапа становится сбор максимального количества информации о продольном раскрое круглых лесоматериалов. Далее производится анализ собранной информации: уточняется сущность каждого решения, выбирается терминология для однозначного описания решений, устанавливается совокупность технологических и конструктивных требований, предъявляемых к выбранным решениям, выделяются наиболее эффективные и перспективные из них, намечаются тенденции развития функциональной системы, определяются направления развития решений, выделяются группы сходных решений.

Продольный раскрой круглых лесоматериалов – функциональная система, являющаяся частью общей технической системы переработки лесоматериалов. Функция продольного раскроя разделяется на подфункции, например: разделение пачки круглых лесоматериалов, подача бревен к пильному или фрезерному узлу, фрезерование и пиление бревен, перемещение досок к узлам для дальнейшей переработки. Эти подфункции осуществляются отдельными механизмами и в совокупности образуют цепочку выполняемых технологических приемов.

Важным этапом морфологического анализа является выделение классификационных признаков, инвариантных к рассматриваемой функциональной системе. Для этого необходимо разрабатывать и анализировать эволюционные цепочки технологических и конструкторских изменений функциональной системы. Кроме того, целесообразно использование обобщенных расчетных схем – например, анализ обобщенной кинематики резания позволяет расширить область влияния признаков и оценить их взаимосвязи. Часть значений признаков, малозначимых для выполнения продольного раскроя круглых лесоматериалов, возможно исключить из списка (для предмета труда это удаление отходов раскроя лесоматериалов и т. п.).

При таком рассмотрении значений признака предмета труда следует допустить, что смежные функции могут выполняться как до продольного раскроя, так и после него (например, замеры диаметров круглых лесоматериалов). Данные сочетания могут быть осуществлены только по отношению к обрабатывающим технологическим операциям (операция соответствует функции, приемы – подфункциям). Переместительные технологические операции имеют жесткую последовательность выполнения во времени и пространстве. Сравнение показывает, что признак «предмет труда» характеризуется значениями, которые можно расположить в порядке уменьшения от естественного состояния (растущее дерево) до определенного конечного состояния (доска). Аналогичным образом анализируются другие функционально-значимые отношения. В соответствии с известными методами исследований параметров технологий и технических объектов функциональные отношения распределяются по следующим группам: предмет труда, струк-

тура, свойства и параметры элементов функциональной системы; средства при реализации принятой функции по отношению к изменениям предмета труда; характер взаимодействия функциональной системы с предметом труда (кинематика, динамика, расположение в пространстве); комбинация найденных функциональных отношений.

Полнота морфологической таблицы определяется суммой объектов понятий всех признаков и оценивается результативностью получения эффективных технологических и конструктивных решений. При большой концентрации морфологической таблицы учитывается большое число свойств функциональной системы и функциональных отношений между ее элементами, однако чрезмерно возрастает количество условных вариантов, равное произведению всех значений признаков. Поэтому вводятся внешние ограничения, которые определяются технологическими и конструктивными требованиями к искомому вариантам системы, и внутренние, выявляющиеся исходя из условий совместимости значений признаков друг с другом.

Синтез технологических и конструктивных решений осуществляется путем проверки соответствия условного варианта принятым требованиям и ограничениям. При выполнении указанных условий вариант решения после сравнения с решениями из научной, технической и патентной литературы может соответствовать следующим состояниям: найденное решение общеизвестно и существует на производстве; известно в научно-технической и патентной литературе; обладает научной новизной. На основе анализа и синтеза возможно дальнейшее уточнение признаков и их значений, т. е. совершенствование морфологической таблицы. Основные положения поиска новых технологических и конструктивных решений совершенствования продольного раскроя круглых лесоматериалов приведены в работах [1–3, 10–26].

При продольном раскрое круглых лесоматериалов применяют различные способы: индивидуальный, развальный и брусово-развальный. Для объективной оценки методов раскроя необходимо принимать во внимание качественные признаки распиливаемых лесоматериалов, такие как порода, влажность, температура, размеры гнили, сбеги, закомелистость, овальность, кривизна, наличие и расположение сучков и др. Целесообразно качественные признаки учитывать путем использования соответствующих известных математических моделей. В основном технологический процесс продольного раскроя круглых лесоматериалов определяется характером используемых установок, оборудования.

Были выполнены патентные исследования. В результате выявлены основные охраняемые и опубликованные заявочные документы, касающиеся программ продольного раскроя круглых лесоматериалов. Как уже отмечалось ранее, полученные решения могут быть реализованы на данный момент на производстве, известны в научно-технической и патентной литературе, обладают научной новизной. Встает проблема синтеза таких способов и устройств, которые имеют мировой уровень, т. е. были бы патентноспособны, а главное, учитывали специфику отрасли в нашей стране и помогли бы интенсифицировать продольный раскрой круглых лесоматериалов.

Способы формирования групп лесоматериалов, которые реализованы на отечественном и зарубежном оборудовании, представлены в работах [7, 8]. Известен способ поштучно-группового продольного раскроя круглых лесоматериалов.

териалов, реализуемый на установках с продольным перемещением предмета труда. Сущность способа заключается в том, что в процессе продольного раскря круглые лесоматериалы, сходные по качественным признакам и близкие по диаметрам, формируют в группы с учетом возможности установки для их одновременной обработки [4].

С целью поиска новых вариантов технологических схем поштучно-группового раскря круглых лесоматериалов можно выделить следующие основные варианты осуществления раскря путем формирования групп по нескольким близким диаметрам и дальнейшего раскря развальным, брусово-развальным способами и способом индивидуального раскря.

На рис. 1, *а* приведен вариант технологической схемы, основанной на поштучно-продольном перемещении круглых лесоматериалов при индивидуальном способе раскря. После отделения одной доски лесоматериалы возвращаются и поворачиваются вокруг оси бревна. При данном технологическом решении могут быть достигнуты преимущества поштучного раскря круглых лесоматериалов: увеличение полезного и качественного выхода продукции раскря.

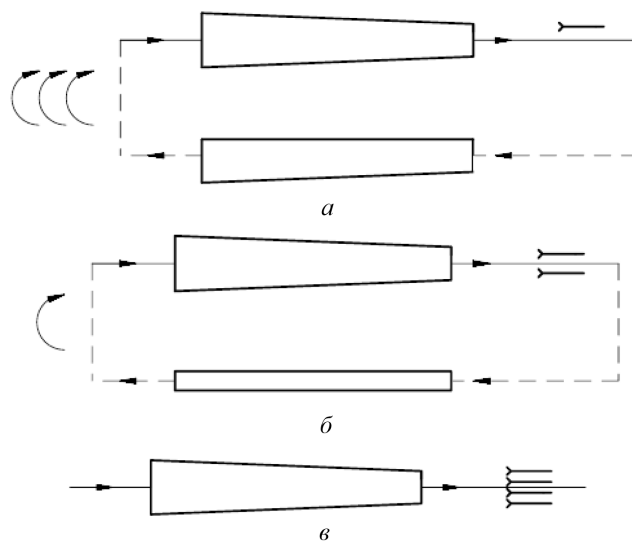


Рис. 1. Схемы способов раскря круглых лесоматериалов: *а* – индивидуальный; *б* – брусово-развальный; *в* – развальный

Fig. 1. Schematic representation of crosscutting methods for round timber: *a* – individual; *b* – plain sawing; *c* – live sawing

На рис. 1, *б* представлен вариант технологической схемы, в основе которой лежит продольное перемещение круглых лесоматериалов при брусово-развальном способе раскря. После получения двухкантного бруса происходит его возврат и поворот на 90° .

На рис. 1, *в* показан вариант технологической схемы развального способа раскря круглых лесоматериалов при их продольном перемещении. Приведенные технологические решения могут обеспечить повышение производительности, создать необходимую устойчивость при распиловке круглых лесоматериалов и равномерно загрузить пильные механизмы.

Возможны и комбинированные варианты технологических решений, которые легко komponуются с использованием схем, приведенных на рис. 1. Так, на основании синтеза технических решений продольного раскря круглых лесоматериалов запатентована новая программа раскря круглых лесоматериалов с ядровой гнилью [6]. Согласно разработанной программе, круглые лесоматериалы сортируются на группы смежных диаметров и поштучно раскраиваются. Раскря круглых лесоматериалов с ядровой гнилью производится на лесопильных рамах по брусово-разваль-ной схеме. Лесоматериалы закрепляются прижимами на подающем устройстве и при помощи рябух подаются к лесопильной раме 1-го ряда. Двухкантный брус центрируется на подающем устройстве и роликом подается к лесопильной раме 2-го ряда. Пильные механизмы рам представляют собой рамки с установленными в них плоскими пилами. Пилы имеют напаянные зубья. Пильная рамка совершает колебательные движения. Привод рамки осуществляется от электродвигателя с установленным на нем маховиком с кривошипом. Маховик получает вращение от электродвигателя при помощи ременной передачи. Подача круглых лесоматериалов и двухкантного бруса производится импульсно.

На 1-м проходе получают двухкантный брус с сердцевинной гнилью и боковые необрезные тонкие пиломатериалы (рис. 2, *a*), на 2-м проходе – 2 бруска с сердцевинной гнилью, а также боковые необрезные пиломатериалы (рис. 2, *b*).

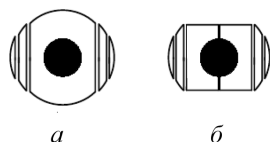


Рис. 2. Схема раскря круглых лесоматериалов: *a* – выпилка двухкантного бруса и боковых необрезных пиломатериалов; *b* – распиловка двухкантного бруса

Fig. 2. Cutting scheme for round timber: *a* – carving of two-edged cant and side unedged lumber; *b* – sawing of two-edged cant

Далее бруски подвергаются камерной сушке мягкими режимами и влажность древесины доводится до 14 ± 2 %. Посредством фрезерования удаляется гниль. После фрезерования бруски имеют уголкового профиля (рис. 3).

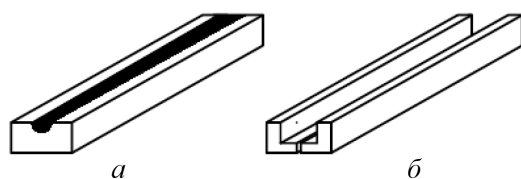


Рис. 3. Фрезерование и распиловка брусков: *a* – бруски с ядровой гнилью; *b* – элементы уголкового профиля

Fig. 3. Milling and sawing into bars: *a* – bar with heartwood rot; *b* – elements of angle bar

Бруски сортируются таким образом, чтобы качество древесины отвечало 2-му сорту по ГОСТ 8486. Это примерно соответствует классу прочности С24 по европейскому стандарту EN 338–2011. Затем бруски склеиваются попарно для получения заготовки в виде швеллера (рис. 4, *b*). Заготовки в виде швеллеров склеиваются между собой по широкой пласти, и получается двутавровая балка (рис. 4, *в*). Склеивание производится водостойким полиуретановым клеем.

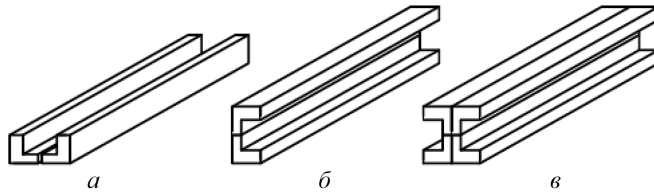


Рис. 4. Склеивание двутавровой балки: *a* – элементы уголкового профиля; *б* – уголковые элементы, склеенные в швеллер; *в* – склеенные между собой швеллеры

Fig. 4. I-beam bonding: *a* – angle bar elements; *б* – angle bar elements glued together in channel section; *в* – channel sections glued together

Разработка программы раскря осуществлялась с целью повышения производительности применяемого для раскря оборудования, увеличения качественного выхода получаемых пиломатериалов и снижения стоимости их производства. Эффективность продольного раскря круглых лесоматериалов определяется теми исходными принципами и требованиями, которые закладываются в основу технологического процесса еще на стадии проектных разработок. Установить возможности технологического процесса продольного раскря лесоматериалов на стадии предпроектного решения проблемы можно путем анализа целевых функций

$$Z = f_1(N, Y_n, Y_b) \rightarrow \min; \Pi_{\text{см}} = f_1(N, Y_n, Y_b) \rightarrow \max; K = f_1(N, Y_n, Y_b) \rightarrow \max,$$

где Z – затраты на реализацию технологического процесса, р.; N – установленная мощность привода, кВт; Y_n, Y_b – соответственно количество необходимых и возможных программ раскря; $\Pi_{\text{см}}$ – сменная производительность основного оборудования, м³; K – качественный выход продукции в стоимостном выражении.

Затраты определили по формуле

$$Z = a_1 + a_2 N,$$

где a_1, a_2 – коэффициенты, учитывающие условия использования установок для продольного раскря круглых лесоматериалов; N – общая установленная мощность двигателей установки, кВт,

$$a_1 = K_3 Z_T n_0 (1 + \alpha_b) + 0,01 K_k \Pi (P_1 + P_2) / D_c,$$

K_3 – средний коэффициент доплат для основных и вспомогательных рабочих; Z_T – средняя тарифная ставка основных и вспомогательных рабочих, р.; n_0 – число основных рабочих, занятых в смену, чел.; α_b – коэффициент, учитывающий число вспомогательных рабочих по отношению к основным; K_k – коэффициент, учитывающий расходы на доставку и монтаж основного оборудования, строительство зданий и сооружений, а также вспомогательное оборудование; Π – стоимость основного оборудования, р.; P_1, P_2 – соответственно нормативные проценты отчислений в год на текущий (средний) ремонт и амортизацию, %; D_c – число рабочих смен в году.

$$a_2 = a_N T K_c \Pi_c K_m N,$$

a_N – коэффициент, учитывающий мощность вспомогательного оборудования, обслуживающего основной механизм; T – продолжительность смены, ч;

K_c – коэффициент спроса электроэнергии; C_c – стоимость 1 кВт·ч, р.; K_m – коэффициент, учитывающий расходы на вспомогательные и смазочные материалы; N – общая установленная мощность двигателей установки для продольного раскроя круглых лесоматериалов, кВт.

Сменная производительность лесопильного потока на базе двухэтажных рам рассчитывается по формуле

$$\Pi_{см} = 3600T\varphi_1\varphi_2 \sum \left(\frac{V_{xi}}{t_{пр}} \right),$$

где φ_1 – коэффициент использования рабочего времени; φ_2 – коэффициент загрузки оборудования; V_{xi} – объем i -го обрабатываемого бревна в группе, м³; $t_{пр}$ – время распиловки бревна, с.

Качественный выход продукции в стоимостном выражении

$$K = \left(\sum_{j=1}^p K_{Mj} C_{пj} V_{пj} \right) / \sum_{j=1}^q C_{cj} V_{cj}, \quad (1)$$

где K_{Mj} – коэффициент интенсификации в результате маркетинга j -го вида продукции; p – количество видов продукции; q – количество видов сырья; $C_{пj}$, C_{cj} – соответственно стоимость единицы j -го вида продукции и сырья, р./м³; $V_{пj}$, V_{cj} – соответственно объем j -го вида продукции и сырья, м³.

Коэффициент интенсификации процесса

$$K_{Mj} = \frac{F_i + \Delta F_i}{F_i},$$

где F_i , ΔF_i – соответственно значение фактора до интенсификации и величина повышения фактора после интенсификации.

Необходимого повышения производительности установок без снижения качества раскроя можно достигнуть, используя новые способы продольного раскроя круглых лесоматериалов, основанные на продольном перемещении в процессе обработки. Качественный выход определяется количеством реализуемых программ раскроя на соответствующем оборудовании. Количество реализуемых программ раскроя на рассматриваемом оборудовании Y_b , предположительно, определяется числом автономных пильных механизмов, возможностью базирования лесоматериалов относительно пил. Очевидно, для всех установок с возможностью базирования лесоматериалов относительно пильного механизма и наоборот отношение $Y_b / Y_n = 1$, где Y_n – количество необходимых программ раскроя, реализуемых на рассматриваемой установке.

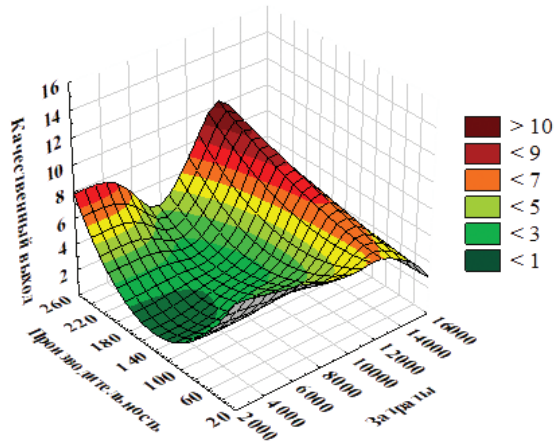
Для выполнения расчетов использован статистический пакет Stat Soft Statistica 10.0.1011 [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Применив статистический пакет Stat Soft Statistica 10.0.1011, построили плоскостную диаграмму изменения затрат, производительности установки в смену и качественного выхода (рис. 5).

Рис. 5. Диаграмма распределения значений затрат, производительности и качественного выхода

Fig. 5. Diagram of the distribution of cost values, productivity and yield quality



Задачу поиска оптимального способа решили с использованием множества Парето (Π):

$$\Phi(x) \rightarrow \min, x \in \Pi;$$

$$\Pi = x \in D: \exists x^0 \in D; f_j(x^0) < f_j(x); \\ j = 1, m; f(x^0) \neq f(x),$$

где Φ – целевая функция; D – область допустимых решений; m – количество критериев или исходная задача; $\psi(F) \rightarrow \min, F \in \Pi_F, \Pi_F = F(\Pi)$ – образ множества Парето в пространстве локальных критериев.

При помощи метода Парето находили наиболее оптимальные решения: путь решения проблемы состоял в выделении множества Парето и организации на его основе поиска оптимального решения. Далее при необходимости множества Парето делили на подмножества решений с одинаковой структурой, обеспечивая условия применимости метода комплексного критерия.

Определить возможности технологического процесса продольного раскроя круглых лесоматериалов на стадии предпроектного решения проблемы возможно путем анализа целевой функции

$$\Phi = Z / \Pi_{cm} \rightarrow \min.$$

К управляемым (внутренним) параметрам оборудования, выбираемым конструкторами при проектировании, относится установленная мощность двигателей. Определение оптимальных мощностей является основной задачей оптимизации параметров оборудования, так как от мощности в основном зависят и остальные параметры: производительность, энергоемкость, металлоемкость и др. Оптимальную величину установленной мощности для различных и наиболее характерных внешних факторов находят по следующей методике:

устанавливают значимость $\Pi_{cm} = f(N)$ для различных внешних факторов;

определяют значимость стоимости оборудования $\Pi = \varphi(N)$ для рассматриваемых внешних факторов;

для разных внешних факторов находят целевую функцию Φ , которую стремятся минимизировать;

составляют уравнение $d\Phi / dN = 0$, решают его и получают некоторое значение N^* ;

вычисляют $d^2\Phi(N^*) / dN^2$, если полученное значение > 0 , то $N^* = N_{\text{опт}}$.

В соответствии с описанной методикой определены оптимальные параметры технологических и конструктивных решений, включающих ранее найденные точки Парето из всего морфологического множества рассматриваемой функциональной системы (см. таблицу).

Результаты оптимизации параметров установок для продольного раскроя круглых лесоматериалов с целью выбора направлений интенсификации на стадии предпроектного решения проблемы

Results of optimization parameters for rip cutting of round timber for selection of intensification options at project's preliminary problem-solving stage

Параметр	Оптимальное значение по точкам множества Парето								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Φ , р./м ³	2,51	7,18	9,21	17,60	20,99	18,33	21,30	24,84	21,63
$N_{\text{опт}}$, кВт	22,0	127,7	127,7	22,0	127,7	68,0	68,0	127,7	137,7

С использованием результатов оптимизации по методу Парето и на их основе методом комплексного критерия (1) определены эффективные варианты технологических и конструктивных решений поперечной распиловки лесоматериалов. Следует отметить, что экономические показатели принимались в расчетах с учетом реальных инфляционных процессов, а сравниваемые варианты рассматривались в равных условиях. Дальнейший выбор эффективных решений может быть осуществлен с помощью экспертных оценок этих решений.

Предложенная методика выбора направлений интенсификации продольного раскроя круглых лесоматериалов позволяет определять эффективные технологические и технические решения на предпроектной стадии.

Выводы

1. Морфологический анализ способов продольного раскроя круглых лесоматериалов как функциональных систем – многоаспектная классификация технологий, машин и оборудования – имеет преимущества по сравнению с известными схемами классификации в количественном (произведение значений всех признаков) и качественном (постоянное совершенствование признаков и их значений в системе, возможность кодировки решений с целью автоматизированного хранения известных решений и поиска новых) отношениях.

2. Разработанная методика систематизации и поиска новых технологических, конструктивных решений и ее апробация доказывают высокую эффективность морфологического метода в исследовании функциональной системы «продольный раскрой круглых лесоматериалов».

3. Результаты морфологических исследований следует использовать при создании банка данных в виде закодированных решений с целью автоматизированного хранения и поиска как известных, так и новых решений.

4. Для автоматизированного поиска новых технических и конструктивных решений продольного раскроя круглых лесоматериалов необходимо раз-

работать эвристическую, математическую модели и алгоритм поиска с учетом ограничений в системе и критерия оценки научной новизны.

5. Следует выделить прогрессивные направления интенсификации поперечной распиловки лесоматериалов:

применение поштучно-группового раскроя круглых лесоматериалов, в основе которого лежит способ продольного перемещения круглых лесоматериалов на потоках лесопильных заводов;

создание адаптивных систем (единый привод с возможностью саморегулирования режимов пиления и перемещения лесоматериалов) с целью снижения энергоемкости процесса поперечной распиловки лесоматериалов и приведенных затрат на его реализацию.

6. Дальнейшее повышение эффективности продольного раскроя круглых лесоматериалов возможно путем совершенствования раскроя с целью получения высококачественной конечной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агапов А.И. Оптимизация раскроя пиловочника с выпиливанием трех брусьев. Киров: ВятГУ, 2019. 478 с.

Agapov A.I. *Optimization of Sawlog Cutting with Three Bars Output*. Kirov, Vyatka State University Publ., 2019. 478 p. (In Russ.).

2. Иванов А.В. Технология продольного раскроя круглых лесоматериалов // Наука без границ. 2020. № 6(46). С. 62–66.

Ivanov A.V. Technology of Longitudinal Cutting of Round Timber. *Nauka bez granits* = Science Without Borders, 2020, no. 6(46), pp. 62–66. (In Russ.).

3. Кравцов Е.В., Карпукхин Г.А. Особенности технологических решений в организации производства элементов деревянного домостроения из низкосортной древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2011. № 5. С. 93–97.

Kravtsov E.V., Karpukhin G.A. Features of Technological Solutions in the Organization of Production Elements of Housing from Low-Grade Wood. *Lesnoy vestnik* = Forest Bulletin, 2011, no. 5, pp. 93–97. (In Russ.).

4. Огурцов В.В., Каргина Е.В., Матвеева И.С. Зависимость объемного выхода пиломатериалов от дробности сортировки бревен по толщине // Хвойные бореальной зоны. 2013. № 5-6. С. 71–75.

Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Matveeva I.S. Dependence of the Lumber Volume Output and Their Production Profitability on Divisibility of Log Thickness Sorting Concerning Its Curvature. *Khvoynyye boreal'noy zony* = Conifers of the Boreal Area, 2013, no. 5-6, pp. 71–75. (In Russ.).

5. Олдрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. М.: ВНИИПИ, 1989. 312 с.

Oldrin V.M. *Method of Morphological Analysis of Technical Systems*. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Patent Information Publ., 1989. 312 p. (In Russ.).

6. Патент № 2654720 С1 РФ, МПК В27В 1/00. Способ получения конструкционной пилопродукции из круглых лесоматериалов, имеющих сердцевинную гниль: № 2017131378: заявл. 6.09.2017: опубл. 22.05.2018 / В.Е. Бызов, А.С. Торопов, С.А. Торопов.

Toropov A.S., Mikryukova E.V., Sharapov E.S., Toropov S.A., Byzov V.E., Sedykh M.A. *Method for Obtaining Structural Lumber from Round Timber with Heartwood Rot*. Patent RF, no. RU 2654720 C1, 2018. (In Russ.).

7. Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках // Деревообраб. пром-сть. 1990. № 9. С. 6–10.
- Prokofyev G.F. Intensification of Wood Sawing on Frame Headrig Sawing Lines and Band Saws. *Derevoobrabativaushaya promishlennost'*, 1990, no. 9, pp. 6–10. (In Russ.).
8. Прокофьев Г.Ф., Дундин Н.И. Основные направления интенсификации переработки древесины на лесопильном оборудовании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. № 3. С. 65–72.
- Prokofyev G.F., Dundin N.I. The Main Directions of Intensification of Wood Processing on Sawmill Equipment. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2004, no. 3, pp. 65–72. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/91b/91b43ab31325ae20895d-468653c1a204.pdf>
9. Стукач О.В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством. Томск: ТПУ, 2011. 163 с.
- Stukach O.V. *The Software Package "Statistica" in Solving Quality Management Problems*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 163 p. (In Russ.).
10. Торопов А.С. Исследование предмета труда лесозаготовки. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1995. 16 с.
- Toropov A.S. *Study on the Subject of Forestry Exploitation Labor: Laboratory Operational Manual*. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 1995. 16 p. (In Russ.).
11. Торопов А.С., Торопов С.А., Микрюкова Е.В. Исследование пораженности древесины напеченной гнилью // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 4. С. 95–100.
- Toropov A.S., Toropov S.A., Mikryukova E.V. Investigation of Wood Affected by Stump Rot. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 4, pp. 95–100. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/eb2/eb2a4ad3da8cb6509a4164b19962c3e3.pdf>
12. Baltrušaitis A., Pranckevičienė V. The Influence of Log Offset on Sawed Timber Volume Yield. *Materials Science*, 2005, vol. 11, no. 4, pp. 403–406.
13. Ikonen V.P., Kellomäki S., Peltola H. Linking Tree Stem Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Sawed Timber Properties Through Simulated Sawing. *Forest Ecology and Management*, 2003, vol. 174, no. 1-3, pp. 251–263. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00035-X)
14. Koch P. *Wood Machining Processes*. New York, Ronald Press Co. Publ., 1964. 530 p.
15. Kollman F., Cote W.A.Jr. *Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood*. Berlin Heidelberg, Springer Publ., 1968. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
16. Orłowski K.A., Chuchala D., Szczepanski M., Migda W., Wojnicz W., Sandak J. Lateral Forces Determine Dimensional Accuracy of the Narrow-Kerf Sawing of Wood. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, p. 86. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04129-3>
17. Parra Galvez J.L.A., Borenstein D., da Silveira Farias E. Application of Optimization for Solving a Sawing Stock Problem with a Cant Sawing Pattern. *Optimization Letters*, 2018, vol. 12, no. 8, pp. 1755–1772. <https://doi.org/10.1007/s11590-017-1178-x>
18. Ross R.J., Brashaw B.K., Wang X., White R.H., Pellerin R.F. *Wood and Timber Condition Assessment Manual*. Madison, WI: Forest Products Society Publ., 2004. 74 p.
19. Sandberg D. Value Activation: A Concept for New Applied Processing Technology Star-Sawing Technique. *Proceedings of the International Conference on Value-Added Wood Processing, Nov. 13–14, 1997*. Vancouver, BC Canada, 1997, pp. 1–10.
20. Sandberg D. Radially Sawed Timber – the Primwood Method for Improved Properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2005, vol. 63, no. 2, pp. 94–101. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0531-9>

21. Shanin I.I. Definition of Factors Influencing Innovative Development of Enterprises of Timber Processing Complex. *Proceedings of the International Conference "Economy in the Modern World" (ICEMW 2018)*. Atlantis Press, 2018, pp. 205–209. <https://doi.org/10.2991/icemw-18.2018.38>
22. Shenga P.Ah., Bomark P., Broman O., Sandberg D. Log Sawing Positioning Optimization and Log Bucking of Tropical Hardwood Species to Increase the Volume Yield. *Wood Material Science and Engineering*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 257–262. <https://doi.org/10.1080/17480272.2016.1275788>
23. Szczawinski M., Biernacka J. Valuation of Experimental Sawing of Low-Grade Pine Logs (WCO). *Engineering*, 2010. pp.127–130.
24. Todoroki Chr., Rönqvist M. Log Sawing Optimization Directed by Market Demands. *NZ Journal of Forestry*, February, 2001, pp. 29–33.
25. Todoroki Chr., Rönqvist M. Dynamic Control of Timber Production at a Sawmill with Log Sawing Optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, no. 1, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1080/028275802317221118>
26. Yerbury M.D., Cooper R.J. Curve Sawing Spruce Sawlogs Containing Sweep Can Reduce Drying Distortion When Compared with Conventional Sawing. *Forestry*, England, London, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 443–450. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq026>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.16.022.6.034

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-146-159

Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле

Хоанг Минь Кхоа, аспирант; ResearchID: [GXG-6942-2022](https://orcid.org/0000-0002-6731-0033).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6731-0033>

Я.В. Казаков[✉], д-р техн. наук, проф.; ResearchID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Е.О. Окулова, учебный мастер; ResearchID: [S-6096-2019](https://orcid.org/0000-0003-1798-1872).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1798-1872>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; hoangminhkhhoa.vfu@gmail.com, j.kazakov@narfu.ru[✉], e.okulova@narfu.ru

Поступила в редакцию 21.02.22 / Одобрена после рецензирования 18.05.22 / Принята к печати 23.05.22

Аннотация. Древесина тропических растений, в том числе бамбука, обладает большим потенциалом из-за быстрого роста, простоты выращивания, низкой стоимости и характеристик, ценных для целлюлозно-бумажной промышленности. Рассмотрены структурно-морфологические свойства небеленой целлюлозы, полученной сульфатным способом из древесины бамбука *Vambusa blumeana*, местом произрастания которого является Республика Вьетнам. Сульфатная варка проведена на автоклавной системе CAS 420. Бамбуковая целлюлоза имела выход 41,7 %, число капша – 17,3. Структурно-морфологические свойства волокна измерены на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester, после размола на мельнице Йокро до 60 °ШР. Цифровые микрофотографии получены на микроскопе ImagerM2m Carl Zeiss. Выполнено сравнение динамики структурно-размерных свойств целлюлозы из бамбука и производственной хвойной и лиственной небеленой целлюлозы. Установлено, что при общем, аналогичном лиственной и хвойной целлюлозе, характере изменения свойств при размоле: уменьшении средней длины волокна (с 1,90 до 1,21 мм), числа изломов на волокно (с 0,78 до 0,72), средней длины сегмента (с 1,17 до 0,86 мм), увеличении средней ширины (с 17,8 до 20,6 мкм), фактора формы (с 81,7 до 85,6), содержания мелочи (с 1,8 до 7,0 %) – изменение структурно-размерных характеристик волокна у целлюлозы из бамбука происходит в наибольшей степени. Пониженная ширина волокон при их высокой длине обеспечивает наибольший коэффициент вытянутости волокон (от 106,6 у неразмолотой до 58,8 при 60 °ШР) по сравнению с хвойной (81,3...60,6) и особенно лиственной (44,4...36,0) целлюлозой. Это приводит к уменьшению фактора формы и более легкому повреждению волокон в условиях гидромеханического воздействия при размоле, что выражается в изменении числа изломов на волокне. Максимальные изменения в структуре, размерах, форме волокна и содержании мелочи происходят уже в первые

© Кхоа Х.М., Казаков Я.В., Окулова Е.О., 2023



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

10 мин размола, отсюда следует вывод о низкой прочности бамбуковых волокон и их легкой повреждаемости. Можно предположить, что использование небеленой целлюлозы из бамбука в композиции бурых видов бумаги не приведет к повышению их прочности.

Ключевые слова: целлюлоза из бамбука, бумагообразующие свойства, структурно-морфологические свойства целлюлозы, размол целлюлозы, длина волокна, ширина волокна, фракционный состав

Для цитирования: Кхоа Х.М., Казаков Я.В., Окулова Е.О. Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 146–159. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-146-159>

Original article

Features of Changing Structural and Morphological Properties of Bamboo Pulp During Refining

Hoang M. Khoa, Postgraduate Student; ResearcherID: [GXG-6942-2022](https://orcid.org/0000-0002-6731-0033),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6731-0033>

Yakov V. Kazakov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Elena O. Okulova, Training master; ResearcherID: [S-6096-2019](https://orcid.org/0000-0003-1798-1872),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1798-1872>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; hoangminhkhhoa.vfu@gmail.com, j.kazakov@narfu.ru[✉], e.okulova@narfu.ru

Received on February 21, 2022 / Approved after reviewing on May 18, 2022 / Accepted on May 23, 2022

Abstract. The wood of tropical plants, including bamboo, has great potential due to its rapid growth, simple cultivation, low cost, and characteristics suitable for the pulp and paper industry. The study considers the structural-morphological properties of unbleached kraft pulp from the wood of *Bambusa blumeana*, which grows in the Republic of Vietnam. Kraft cooking was carried out on an autoclave system, CAS 420. The obtained bamboo pulp had a yield of 41.7 %, the Kappa number was 17.3. Structural and morphological properties are determined by an automatic fiber analyzer, L&W Fiber Tester. Digital microphotographs were taken with an ImagerM2m Carl Zeiss microscope. Samples were studied before and after refining at the Yokro mill up to 60 °SR. A comparison of the change in the structural and dimensional properties of bamboo pulp fibers was made with industrial softwood and hardwood unbleached pulp. It has been established that, with a general, similar to hardwood and softwood pulp, the nature of the change in properties during refining – a decrease in the average fiber length (from 1.90 up to 1.21 mm), an increase in width (from 17.8 to 20.6 μm), shape factor (from 81.7 to 85.6 %), fines content (from 1.8 to 7.0 %), a decrease in the number of kinks per fiber (from 0,78 to 0,72), the average segment length (from 1.17 to 0.86 mm), also observed for softwood and hardwood pulp, the change in the values of the structural and dimensional characteristics of the fibers in pulp from bamboo occurs to the greatest extent. The reduced fiber width with a high fiber length provides the highest values of the fiber slenderness ratio l/w (from 106.6 for unrefined to 58.8 at 60 °SR) in comparison with softwood (from 81.3 to 60.6) and especially hardwood (from 44.4 to 36.0), which in

turn leads to a reduced shape factor and easier damage to the fibers under hydromechanical action during refining, which is expressed in a change in the number of kinks on a fiber. The maximum changes in the structure, size, shape of the fiber and fine content occur already in the first 10 minutes of refining, which indicates the low strength of bamboo fibers and their easy damage. Therefore, it can be assumed that the use of unbleached bamboo pulp in brown paper furnishing will not lead to an increase in its strength.

Keywords: bamboo pulp, papermaking properties, structural-morphological properties of pulp, refining, fiber length, fiber width, fractional composition

For citation: Khoa H.M., Kazakov Ya.V., Okulova E.O. Features of Changing Structural and Morphological Properties of Bamboo Pulp During Refining. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 146–159. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-146-159>

Введение

В современных условиях при поиске новых быстровозобновляемых источников растительного сырья для химической переработки имеет смысл обратить внимание на древесину некоторых тропических растений, таких как, например, бамбук, который обладает большим потенциалом из-за быстрого роста, простоты выращивания, низкой стоимости и характеристик, ценных для деревоперерабатывающей промышленности в целом и для целлюлозно-бумажной в частности [8, 14, 21].

Для российской целлюлозно-бумажной промышленности расширение сырьевой базы возможно за счет использования экономически выгодных волокнистых полуфабрикатов из растений стран Дальневосточного региона и тропических растений, в том числе бамбука. Однако на данный момент в России бамбук недостаточно изучен и не применяется в производстве целлюлозы.

Бамбук произрастает в принципиально других географических и климатических условиях по сравнению с растениями российских лесов, что обуславливает бумагообразующие свойства, отличающихся от свойств целлюлозы из северных пород древесины [11, 18, 19]. Он широко распространен в зонах субтропиков и тропиков. Основные районы выращивания бамбука – Азиатско-Тихоокеанский, Американский регионы и Африка. Около 80 % бамбуковых лесов мира находятся в Азиатско-Тихоокеанском регионе. В Индии и Китае вместе – примерно 70 % бамбуковых лесов Азии [24].

Многие развивающиеся страны, которым не хватает лесных ресурсов, обладают богатыми запасами бамбука. С точки зрения сохранения лесов или устойчивого экономического развития бамбук является важным недревесным волокнистым сырьем для производства целлюлозы и бумаги, особенно для этих развивающихся стран. Бамбук был незаменим для бумажной промышленности на Индийском субконтиненте и в Китае [8]. Анализ состояния химической переработки растительных материалов в Республике Вьетнам показал, что еще в 2004 г. эта страна использовала 448,2 тыс. т бамбука для производства всех видов бумаги (для сравнения: древесины – 270 тыс. т, прочих недревесных материалов – 275,2 тыс. т и макулатуры – 119,2 тыс. т). Сейчас около 50 % древесины, заготовленной в лесах, применяется для производства целлюлозы [9].

Структурно-морфологические свойства волокнистых материалов во многом определяют их бумагообразующие свойства и уровень механических характеристик готовой бумаги. Длина и ширина волокна, его гибкость и спо-

способность сохранять размеры и форму при воздействии силовых факторов технологического процесса массоподготовки имеют решающее влияние на бумагообразующие свойства. В течение практически всего прошедшего периода развития научных знаний о свойствах бумаги постоянно уделялось внимание структурно-размерным или более широко – структурно-морфологическим свойствам растительных волокон, используемых для производства различных видов бумаги и картона [1, 4, 7, 12, 15, 20].

Для обеспечения требуемых потребительских характеристик необходимо изменение начального состояния волокна, т. е. его природных структурно-морфологических свойств, для чего обязателен размол [1, 2, 12].

Для контроля и углубленного исследования структурно-морфологических свойств волокнистых полуфабрикатов применяются современные автоматизированные инструментальные методы. Компьютерные технологии, электронно-оптические устройства и датчики сделали возможными новые виды автоматизированных измерений. Используемые сегодня современные анализаторы волокна позволяют в автоматическом режиме провести измерения характеристик до 20 тыс. отдельных волокон [15]. Математическая обработка измеренных данных дает гистограммы распределения длины и ширины волокон, а также характеристик их кривизны, числа изломов на волокне, доли мелочи и т. п. [3]. Во всех случаях результаты представляются в виде среднего значения, гистограммы распределения характеристик и нескольких показателей размеров волокон, учитывающих взвешенную, объемную или массовую долю [4, 15, 17].

Технология измерений геометрических размеров целлюлозных волокон заключается в анализе волокнистой массы, когда делают цифровые снимки сильноразбавленной суспензии в виде тонкого плоского ламинарного потока и с помощью программы распознавания образов (Image Analysis) определяют геометрические характеристики волокон [15]. Метод стандартизован. Международными стандартами измерения длины волокна с применением автоматических анализаторов являются ISO 16065-1 (используется поляризованный свет) и ISO 16065-2 (неполяризованный свет).

Изучением структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука занимаются уже достаточно давно [21–23], и геометрические размеры выделенных химическим и механическим путем волокон бамбука известны [13, 14, 16, 24]. Но в то же время установлены факты существенных отличий свойств волокон бамбука разных видов, а условия и место произрастания в данном случае оказывают чрезвычайно большое влияние [16, 18]. Так, средняя длина волокна целлюлозы из бамбука в зависимости от вида и места произрастания может составлять 1,68...2,18 мм при интервале изменения длины отдельных волокон 0,46–0,57...4,13–5,67 мм [16].

Целью данной работы является исследование закономерностей формирования при размоле структурно-морфологических свойств целлюлозного волокна из бамбука, произрастающего в Республике Вьетнам.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются целлюлозные волокна из бамбука *Vambusa blumeana*, место произрастания которого – Республика Вьетнам. Возраст растений составляет 3...5 лет, внешний диаметр стебля – 7...10 см, тол-

щина его стенки – 0,5...1,0 см. Для получения целлюлозы из бамбука ручным способом изготовлена щепка размерами $(15\pm 3)\times(25\pm 2)\times(5\pm 1)$ мм и проведена сульфатная варка на автоклавной системе CAS 420 (CRS Reactor Engineering, Швеция, 2013). Промытую целлюлозу вручную отжимали до сухости 21 % и хранили в герметичном пакете в холодильнике при температуре +4 °С. Полученная бамбуковая целлюлоза имела выход 41,7 %, число каппа – 17,3.

Размол в лабораторных условиях выполнен на мельнице Йокро (Frank-PTI, 2010) при концентрации массы 6 % в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 (ИСО 5264/3–79). Отбор образцов целлюлозной массы для анализа проведен до размола (после роспуска в гидроразбивателе) и через каждые 10 мин размола до итоговой степени помола 60 °ШР. У каждой пробы, взятой из размольного стакана, сразу определяли степень помола, отбирали пробу (примерно 0,05...0,10 г по а. с. волокну) для получения микроскопических фотографий и анализа структурно-морфологических свойств. Целлюлозную суспензию хранили до выполнения анализов в пробоотборниках, без сушки, при неизменной концентрации 6 %.

Микроскопические исследования волокон целлюлозы проведены на исследовательском моторизованном микроскопе высокого разрешения Imager M2m Carl Zeiss (Германия, 2011) с получением цифровых микрофотографий в проходящем свете (увеличение в 100 раз), предусматривающих возможность измерений микрообъектов за счет определения масштаба изображений.

Структурно-морфологические свойства целлюлозы установлены на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester (Lorentzen&Wettre, Швеция, 2010) [1–4, 6, 15], позволяющем выполнять расширенную количественную оценку в автоматическом режиме (в соответствии с ISO 16065-1). Для проведения анализа достаточно 0,1 г волокна в пересчете на абсолютно сухую массу. Разрешение во время измерения составляет 0,2 мкм. Диапазоны измерений следующие: длина волокон – 0,2...7,5 мм; ширина волокон – 10...100 мкм; фактор формы (кривизна) волокон – 50...100 %; идентификация мелочи при длине волокна – менее 0,2 мм. Полный цикл анализа одной пробы, включая разбавление и промывку, занимает около 6 мин, из которых на измерение структурно-морфологических характеристик волокон затрачивается около 100 с.

При помощи анализатора волокна Fiber Tester получены основные структурно-морфологические характеристики образцов: средняя длина (арифметическая, взвешенная по длине, взвешенная по массе), мм, и ширина волокон, мкм; средний фактор формы волокон (частное от деления проекции длины на фактическую длину, характеризует степень прямизны); доля мелочи (по длине) в образце (взвешенный процент волокон короче 0,2 мм относительно числа волокон длиннее 0,2 мм); грубость (масса волокна на единицу длины), мкг/100 м; средний угол излома, ...°; среднее число изломов на 1 мм длины волокна и на волокно, шт.; средняя длина сегмента, мм. Кроме того, определены характеристики фракционного состава: доля волокон в классах длины и ширины, %, до 75 и 50 классов через 0,1 мм и 2 мкм соответственно; средняя ширина волокон в классах длины, мкм; средний фактор формы волокон в классе.

Фактор формы волокна оценивает степень прямизны (или кривизны) волокон. Он измеряется у волокон, свободно движущихся в ламинарном потоке сильноразбавленной водной суспензии. В этих условиях отклонение формы волокна от прямолинейной определяется гибкостью волокон и наличием на них

локальных повреждений – изломов. Также большое значение имеет длина волокна (особенно коэффициент вытянутости) при сравнении фактора формы у различных полуфабрикатов. Как правило, более длинные целлюлозные волокна являются более искривленными и величина фактора формы у них меньше.

При размоле одновременно протекают 2 процесса. С одной стороны, в результате размола повышается гибкость волокон за счет нарушения сплошности клеточной стенки – внутренней фибрилляции, а также гидратации. С другой стороны, из-за механического воздействия происходит рубка волокон, в основном по ослабленным изломами участкам клеточной стенки. Таким образом, изогнутые ранее концевые участки волокон отрываются.

Поврежденность волокна (оценивают с помощью количеств, углов изломов и размеров прямолинейных сегментов на волокне) является важной характеристикой физических, прочностных и деформационных свойств бумаги. Поврежденность клеточной стенки – наименее изученный фактор, влияющий на комплекс бумагообразующих и физико-механических свойств полуфабрикатов и готовой продукции. Влияние проявляется в виде перегибов, скручивания, складок, микросжатий клеточной стенки волокна, возникающих в процессе получения полуфабрикатов и их последующей обработки, сопровождающейся интенсивными гидромеханическим и механохимическим воздействиями. При этом на слабых участках волокон происходят необратимые изменения [1, 2, 4].

Анализатор Fiber Tester фиксирует отмеченные виды дефектов клеточной стенки как изломы волокна (при условии, что угол составляет свыше 30°) [15]. Влияние количества изломов и их интенсивности на формирование структуры полотна и его прочность зачастую носит разнонаправленный характер. Более деформированные волокна улучшают формирование и плотность листа, но одновременно уменьшают прочность бумаги за счет снижения собственной прочности волокон. Кроме того, в условиях интенсивных нагрузок на волокно при размоле изломы способствуют укорочению волокна.

За результат принимается среднее по 3 параллельным измерениям. По завершении анализа пробы на экране формируется отчет в виде таблиц и графиков, а также выполняется экспорт результатов с возможностью представления в электронной таблице в формате .xls, что позволяет произвести сравнительную оценку различных образцов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки способности целлюлозы из бамбука к размолу, а также для сравнения ее с хвойной (число каппа 25,9) и лиственной (число каппа 16,2) небеленой производственной целлюлозой были построены кривые размола. Все виды целлюлозы не подвергнуты сушке. Кривые размола, представленные на рис. 1, показывают, что разمول целлюлозы из бамбука идет быстрее, но на начальном этапе, до достижения 30 °ШР, скорость размола лиственной целлюлозы несколько выше: она характеризуется большим количеством высокогидрофильных гемицеллюлоз. На последующих этапах, когда начинает нарушаться клеточная стенка, наиболее быстро по сравнению с другими видами целлюлозы растет степень помола у целлюлозы из бамбука, так как поверхность его волокон менее прочная и процессы фибрилляции идут быстрее. Это подтверждается исследованиями [11].

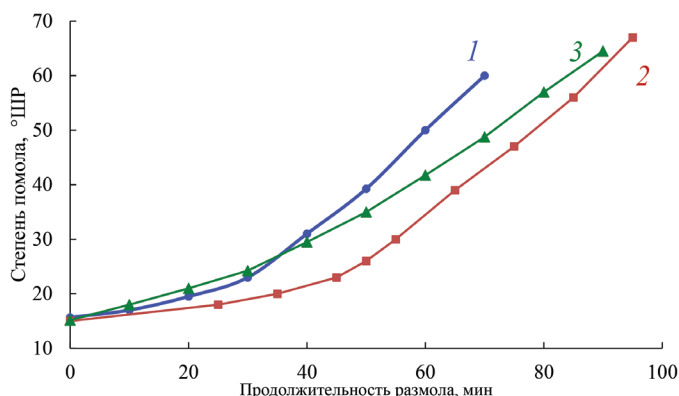


Рис. 1. Кривые размола небеленой целлюлозы: 1 – бамбуковой; 2 – хвойной; 3 – лиственной

Fig. 1. Refining curves of unbleached pulp: 1 – bamboo; 2 – softwood; 3 – hardwood

Проведенные микроскопические исследования образцов целлюлозы из бамбука позволяют оценить изменение состояния волокон при лабораторном размоле (рис. 2). Пробы для приготовления микропрепаратов были получены из суспензии, взятой из размольного стакана мельницы Йокро, т. е. без сушки волокон. В процессе размола, попадая между ножами размалывающего барабана и стенкой размольного стакана, волокна подвергаются воздействию механических и гидродинамических сил, обуславливающему протекание сложных механических, физико-химических и коллоидных процессов в структуре волокон.

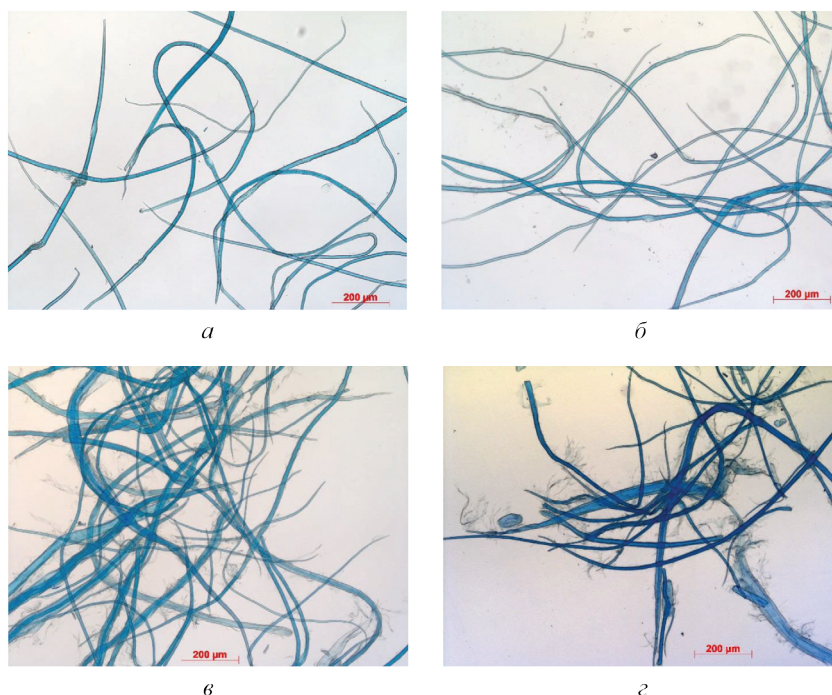


Рис. 2. Микрофотографии образцов бамбуковой целлюлозы при степени помола, °ШР: а – 16; б – 20; в – 40; з – 60

Fig. 2. Microphotographs of cellulose fibers at the degree of refining, °SR: а – 16; б – 20; в – 40; з – 60

На рис. 2 хорошо видны визуальные отличия в морфологии образцов целлюлозы из бамбука при увеличении степени помола. До размола образцы представляют собой длинные, тонкие и сильно изогнутые волокна с глад-

кой поверхностью (рис. 2, *a*). При размоле до 20 °ШР появляются пережимы на некоторых волокнах и образуется незначительный ворс на поверхности (рис. 2, *b*). При дальнейшем размоле наблюдаются существенное нарушение клеточной стенки и ее поверхностное расщепление в продольном направлении на фибриллы (поверхностное фибриллирование), набухание волокон. В результате происходит укорочение волокон (рубка), что выражается в наличии оборванных концов. Волокна становятся более мягкими, повышаются их эластичность и пластичность. На поверхности волокон образуется «начес» тонкого пухообразного материала (рис. 2, *в, г*).

На рис. 3 графически представлено изменение фракционного состава целлюлозы из бамбука по длине (размер класса – 0,1 мм) и ширине (размер класса – 2 мкм) волокна. Взвешивание выполнено по длине волокна. Силовое воздействие размалывающей гарнитуры на волокно приводит к направленным изменениям содержания фракций по длине волокна (рис. 3, *a*), происходят последовательное и достаточно резкое увеличение содержания коротковолокнистых фракций с длиной менее 1 мм и снижение содержания фракций с длиной более 1,5 мм. При этом самое резкое изменение наблюдается уже при размоле до 17 °ШР и, соответственно, сдвигается в коротковолокнистую область положение максимума на кривой распределения по длине волокна.

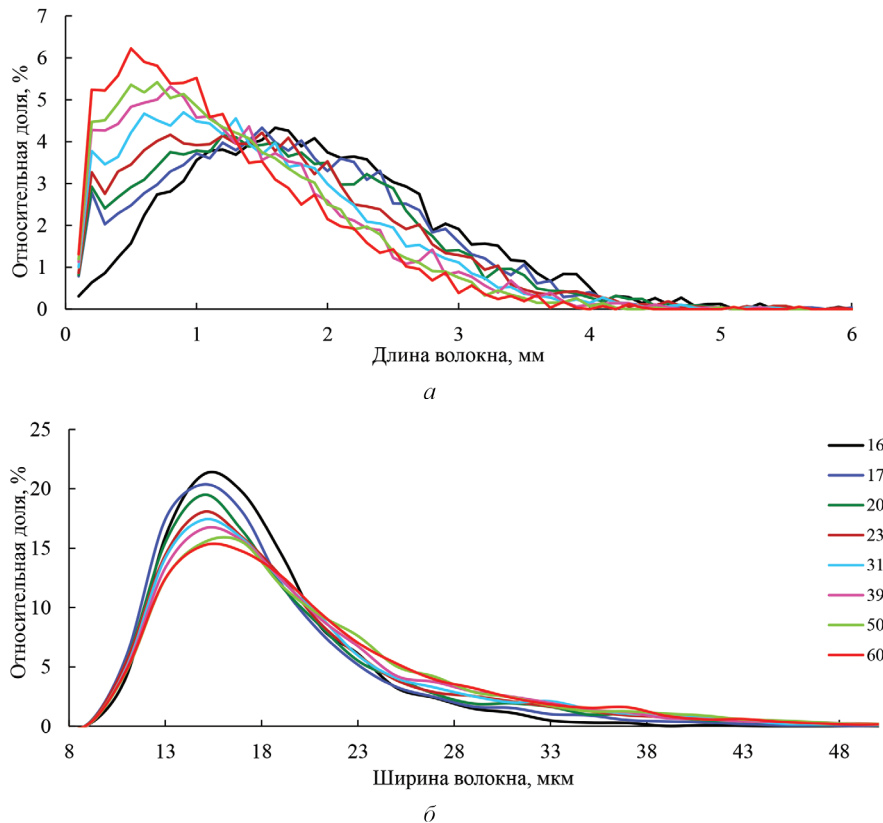


Рис. 3. Фракционный состав бамбуковой целлюлозы при степени помола 16, 17, 20, 23, 31, 39, 50 и 60 °ШР: *a* – по длине волокна; *b* – по ширине волокна

Fig. 3. Fractional composition of bamboo pulp with the degrees of refining 16, 17, 20, 23, 31, 39, 50 and 60 °SR: *a* – by fiber length; *b* – by fiber width

Диаграммы фракционного состава по ширине волокна (рис. 3, б) показывают увеличение полидисперсности волокон по ширине. Положение максимума незначительно перемещается в сторону большего значения, но его высота заметно снижается, т. е. происходит перераспределение фракций с шириной волокна близкой к средней в сторону увеличения. При этом содержание фракций с шириной менее 10 мкм изменяется незначительно. Таким образом, возрастание средней ширины волокна из бамбука при размоле связано в основном не с сдвигом положения максимума, а с ростом содержания фракций шириной более 20 мкм.

Данные о структурно-размерных свойствах волокон из бамбука, изменяющихся при размоле, представлены в табл. 1. Для характеристики длины волокна во всех случаях использована средняя, средневзвешенная по длине величина. Выявлено, что средняя длина волокна закономерно снижается с 1,90 до 1,21 мм за счет рубки, ширина увеличивается с 17,8 до 20,6 мкм за счет сплющивания и набухания волокон. Фактор формы растет с 81,7 до 85,6 % из-за обрыва изогнутых фрагментов волокон при размоле, накопление мелочи в массе изменяется от 1,8 до 7,0 %.

Таблица 1

**Изменение структурно-морфологических свойств волокон из бамбука
при размоле**

**Changes in the structural and morphological properties
of bamboo fibers after refining**

Характеристика	Продолжительность размола, мин							
	0	10	20	30	40	50	60	70
Степень помола, °ШР	16	17	20	23	31	39	50	60
Средняя длина волокна, мм	1,90	1,73	1,68	1,59	1,46	1,36	1,30	1,21
Средняя ширина волокна, мкм	17,8	18,1	19,1	19,6	19,8	20,1	20,5	20,6
Коэффициент вытянутости	106,6	95,5	87,8	81,1	73,6	67,6	63,2	58,8
Средний фактор формы, %	81,7	83,8	84,2	84,6	85,1	85,1	85,1	85,6
Содержание мелочи, % (<0,2 мм)	1,8	3,7	3,9	4,3	5,0	5,7	6,0	7,0
Грубость, дг	169	117	112	113	105	113	125	117
Средний угол излома, ...°	58,9	59,4	58,6	57,5	57,3	56,8	56,4	55,8
Число изломов на 1 мм	0,595	0,556	0,594	0,617	0,638	0,696	0,712	0,733
Число больших изломов на 1 мм	0,241	0,230	0,239	0,233	0,237	0,262	0,270	0,259
Число изломов на волокно	0,780	0,754	0,777	0,761	0,728	0,750	0,747	0,721
Число больших изломов на волокно	0,316	0,312	0,312	0,287	0,270	0,283	0,283	0,255
Средний индекс излома	1,635	1,538	1,627	1,674	1,722	1,864	1,913	1,945
Средняя длина сегмента, мм	1,168	1,213	1,167	1,118	1,032	0,949	0,917	0,862

Таким образом, наблюдается направленное изменение структурно-размерных свойств, которое не является уникальным и характерно для всех волокнистых полуфабрикатов. В табл. 2 представлены данные об изменении свойств хвойной и лиственной небеленой целлюлозы [4, 5].

Таблица 2

Изменение структурно-морфологических свойств волокон хвойной и лиственной небеленой целлюлозы при размоле

Changes in the structural and morphological properties of softwood and hardwood fibers after refining

Степень помола, °ШР	Средняя		Коэффициент вытянутости	Средний		Число изломов на волокно	Средняя длина сегмента, мм	Доля мелочи, %
	длина волокна, мм	ширина волокна, мкм		фактор формы, %	угол излома, ...°			
<i>Хвойная целлюлоза</i>								
17	2,34	28,8	81,3	85,0	58,1	0,72	1,68	4,5
20	2,23	29,7	75,1	85,4	56,8	0,75	1,66	4,9
25	2,21	30,4	71,4	85,6	55,9	0,69	1,68	4,8
30	2,09	30,8	68,5	86,0	55,4	0,67	1,59	5,2
40	2,07	31,1	66,6	86,6	55,3	0,59	1,56	5,2
60	1,91	31,5	60,6	87,4	54,5	0,48	1,49	6,2
<i>Лиственная целлюлоза</i>								
15	0,99	22,3	44,4	89,3	48,4	0,59	0,70	2,9
20	0,96	23,0	41,7	91,7	52,3	0,33	0,83	3,1
30	0,95	24,0	39,6	91,0	53,3	0,38	0,79	3,3
60	0,91	25,3	36,0	89,2	53,2	0,50	0,71	3,6

Волокно хвойной целлюлозы до размола имеет большую среднюю длину (2,34 мм) и большую среднюю ширину (28,8 мкм), чем у целлюлозы из бамбука. Волокно лиственной целлюлозы до размола характеризуется меньшей средней длиной (0,99 мм), но большей средней шириной (22,3 мкм) по сравнению с целлюлозой из бамбука. Особенно различия в размерных свойствах данных полуфабрикатов видны, если рассмотреть коэффициент вытянутости волокон (отношение длины волокон к ширине) [6, 10] – показатель, характеризующий потенциал структурообразования бумажного листа при отливе. У волокон бамбука показатель максимален – 106,6, и при размоле до 60 °ШР снижается до 58,8 (изменение составляет 47,8). У хвойной целлюлозы коэффициент вытянутости варьирует при размоле от 81,3 до 60,6 (изменение – 20,6), а у лиственной – от 44,4 до 36,0 (изменение – 8,4).

Таким образом, сравниваемые волокнистые полуфабрикаты различаются по длине, ширине и коэффициенту вытянутости. Поэтому особенности изменения структурно-размерных свойств целлюлозы из бамбука в процессе размола удобнее анализировать, если вычислить их относительное изменение, приняв за 100 % величины после роспуска. Графики, отражающие эти закономерности, представлены на рис. 4. При постепенном увеличении степени помола полуфабриката от исходной до 60 °ШР у всех образцов наблюдается снижение средней длины волокна: у бамбука – на 36 %, у хвойной целлюлозы – на 18,5 %, у лиственной – на 8 %. Основное укорочение волокон бамбука происходит уже

на начальных этапах размола – через 10 мин. При этом накапливается мелочь в массе: увеличение составляет 205 отн. % (с 1,8 до 3,7 %), а при размоле до 60 °ШР – 390 отн. % (от 1,8 до 7,0 %).

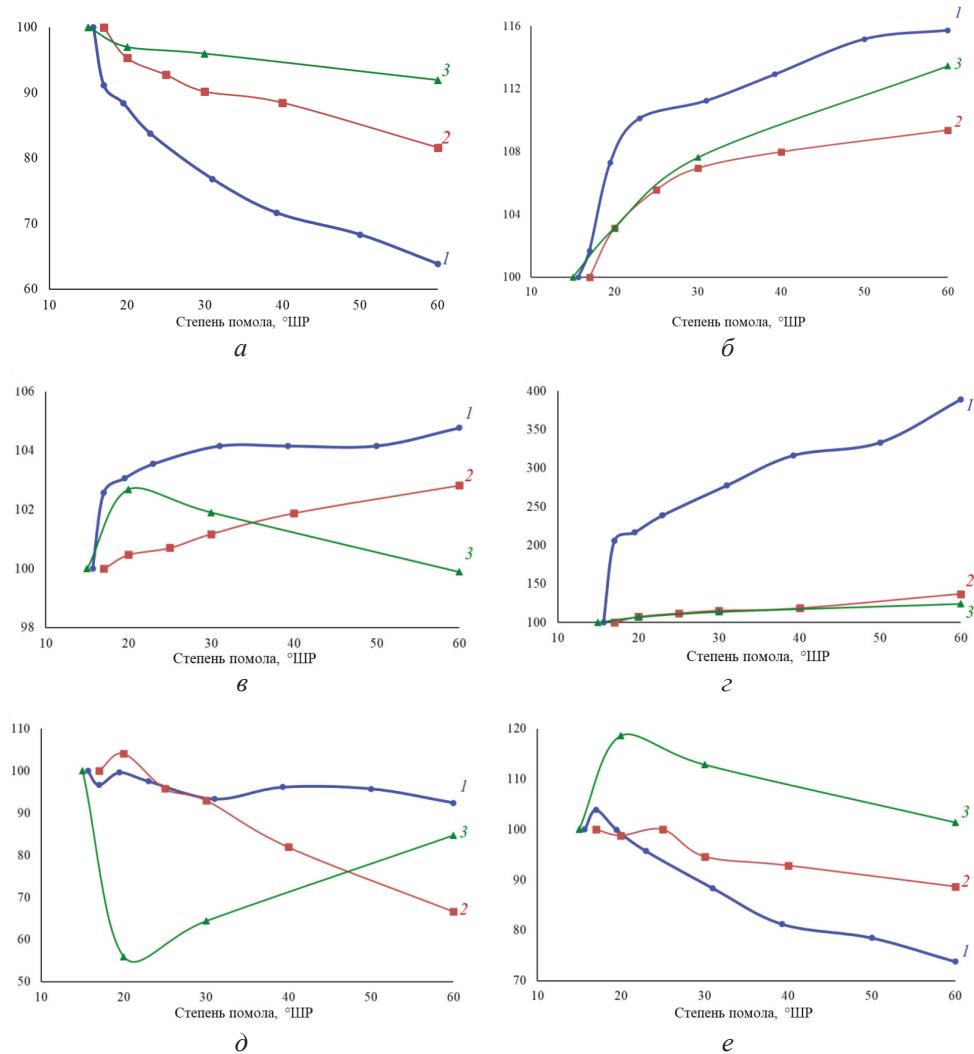


Рис. 4. Относительное изменение, %, структурно-размерных свойств целлюлозы (1 – бамбуковой; 2 – хвойной; 3 – лиственной) в процессе размола: а – средней длины волокна; б – средней ширины волокна; в – среднего фактора формы; г – содержания мелочи; д – среднего числа изломов на волокно; е – средней длины сегмента

Fig. 4. Relative change, %, in the structural and dimensional properties of pulp (1 – bamboo; 2 – softwood; 3 – hardwood) after the refining: а – the average fiber length; б – average fiber width; в – mean shape factor; г – fines content; д – average number of kinks per fiber; е – average segment length

Средний фактор формы у бамбука возрастает с 81,7 до 85,6 %. Наибольший рост наблюдается на начальной стадии размола. Аналогичное, но менее выраженное изменение фактора формы при размоле характерно для длиноволокнистой хвойной целлюлозы. У коротковолокнистой лиственной целлюлозы после первоначального увеличения фактор формы снижается.

Средний угол излома бамбуковой целлюлозы в результате размола после начального небольшого роста непрерывно уменьшается с 59,4 до 55,8°. Это соответствует изменению фактора формы. Количество изломов на волокно снижается при размоле на 7,5 %, и, как следствие, средняя длина сегментов (неповрежденных жестких участков клеточной стенки) существенно сокращается. У бамбуковой целлюлозы это проявляется сильнее, чем у хвойной и лиственной.

Заключение

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента установлены особенности изменения при размоле структурно-размерных свойств небеленой целлюлозы из бамбука *Bambusa blumeana*, местом произрастания которого является Республика Вьетнам. При общем, аналогичном лиственной и хвойной целлюлозе, характере изменения свойств при размоле: снижении средней длины волокна, числа изломов на волокно, средней длины сегмента, увеличении средней ширины, фактора формы, содержания мелочи – изменение структурно-размерных характеристик волокна у целлюлозы из бамбука происходит в наибольшей степени.

Пониженная ширина волокон при высокой длине волокна обеспечивает наиболее высокий коэффициент вытянутости волокон (106,6...58,8) бамбуковой целлюлозы по сравнению с хвойной (81,3...60,6) и особенно лиственной (44,4...36,0) целлюлозой, что приводит к понижению фактора формы и более легкому повреждению волокон в условиях гидромеханического воздействия при размоле.

Максимальные изменения в структуре, размерах, форме волокна и содержании мелочи происходят уже в первые 10 мин размола. Это свидетельствует о низкой прочности бамбуковых волокон и их легкой повреждаемости. Можно сделать предварительный вывод, что использование небеленой целлюлозы из бамбука в композиции бурых видов бумаги не приведет к повышению их прочности. Для подтверждения или опровержения данного предположения необходимы дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белоглазов В.И., Комаров В.И., Дьякова Е.В., Гурьев А.В. Структурно-размерные свойства волокон полуфабрикатов как фактор, определяющий качество тарного картона // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Архангельск, 13–17 сент. 2011 г. Архангельск: САФУ, 2011. С. 57–63.

Beloglazov V.I., Komarov V.I., Dyakova E.V., Guryev A.V. Structural and Dimensional Properties of Semi-Finished Pulp Fibers as a Factor Determining Quality of Container Board Product. *The Issues in Mechanics of Pulp and Paper Materials: Proceedings of the 1st International Scientific-Technical Conference. Arkhangelsk, September 13–17, 2011.* Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011, pp. 57–63. (In Russ.).

2. Гурьев А.В., Дернов А.И., Дьякова Е.В. Оценка свойств волокон в структурированном и неструктурированном состояниях. Часть I. Полуфабрикаты для тарного картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. № 1. С. 67–70.

Guryev A.V., Dernov A.I., Dyakova E.V. Evaluation of Fiber's Properties in Structured and Unstructured States. Part I. Semi-Finished Products for Container Board. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton = Pulp. Paper. Board*, 2013, no. 1, pp. 67–70. (In Russ.).

3. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 269–275.

Kazakov Ya.V. Characterization of Geometrical Parameters of Fibers of Cellulose Semi-Finished Products with the Use of Probabilistic Methods. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of Plant Raw Material, 2014, no. 1, pp. 269–275. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401269>

4. Казаков Я.В., Манахова Т.Н. Бумагообразующий потенциал хвойной небеленой целлюлозы: современный взгляд через автоматический анализатор волокна // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. № 5. С. 34–39.

Kazakov Ya.V., Manakhova T.N. Paper-Forming Potential of Softwood Unbleached Pulp: The Modern View Using the Automatic Fiber Analyzer. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* = Pulp. Paper. Board, 2013, no. 5, pp. 34–39. (In Russ.).

5. Лебедев И.В. Моделирование структуры и деформационных характеристик бумажного листа: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2017. 150 с.

Lebedev I.V. *Simulation of Structure and Deformation Properties of Paper Sheet*. Cand. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2017. 150 p. (In Russ.).

6. 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 Ya.V. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of 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>

7. Aprianis Y., Novriyanti E., Akbar O.T. The Characteristics of Thorny Bamboo (*Bambusa blumeana*) for Dissolving Pulp. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 415, no. 1, p. 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/415/1/012024>

8. Chen Z., Zhang H., He Z., Zhang L., Yue X. Bamboo as an Emerging Resource for Worldwide Pulp and Papermaking. *Bioresources*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 3–5. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.3-5>

9. Draft Strategy for the Development of Forestry in Vietnam for the Period 2006–2020. *Vietnam Administration of Forestry*. (In Vietnamese). Available at: <https://tongcuclamnghip.gov.vn/LamNghiep/Index/chien-luoc-phan-trien-lam-nghip-viet-nam-giai-doan-2006-2020-626> (accessed 25.03.23).

10. Ferdous T., Quaiyyum M.A., Bashar S., Jahan M.S. Anatomical, Morphological and Chemical Characteristics of Kaun Straw (*Seetaria-Ltalika*). *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 288–298. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0057>

11. Gharekhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N.M. Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 115, pp. 785–803. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>

12. Hagaev O., Zou X. A New Concept to Characterize Fiber Development in Refining and Mechanical Pulp Quality for LWC and SC Grades. *Pulp and Paper*, Canada, Ontario, 2007, vol. 108, pp. 50–56.

13. Haiyan Ni, Yonggui Li, Shiwei Fu. Morphological Structure and Properties of Bamboo Shell Fiber. *Journal of Natural Fibers*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 586–595. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1349710>

14. Kamthai S., Puthson P. The Physical Properties, Fiber Morphology and Chemical Compositions of Sweet Bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer). *Natural Science*, 2005, vol. 39, pp. 581–587.

15. Karlsson H., Rinneuo T. *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. Sweden, Kista, AB Lorentzen and Wettre Publ., 2006. 120 p.

16. Lee K.-S., Song W.-Y., Shin S.-J. Elucidating Soda and Soda-Anthraquinone Pulp- ing Characteristics of Korean Bamboo Species. *Peolpeu Jong'i Gi'sul*, 2016, vol. 48, no. 3, p. 44. <https://doi.org/10.7584/ktappi.2016.48.3.044>
17. Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011, vol. 50, no. 22, pp. 12572–12578. <http://dx.doi.org/10.1021/ie201631q>
18. Marja-Sisko, Ilvessalo-Pfäffli Leaf Fibers. *Fiber Atlas: Identification of Papermaking Fibers. Springer Series in Wood Science*. Ed. by T.E. Timell. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Publ., 1995. 400 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07212-7>
19. Mera F.A.T., Xu C. Plantation Management and Bamboo Resource Economics in China. *Ciencia y Tecnología*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i1.93>
20. Monga S., Thapliyal B.P., Tyagi S., Naithani S. Relationship between Strength Properties and Fiber Morphological Characteristics of *S. Officinarum*. *International Journal of Science and Research*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 1549–1556. <https://doi.org/10.21275/ART20164484>
21. Sharma A.K., Dutt D., Upadhyaya J.S., Roy T.K. Anatomical, Morphological, and Chemical Characterization of *Bambusa tulda*, *Dendrocalamus hamiltonii*, *Bambusa balcooa*, *Malocana baccifera*, *Bambusa arundinacea*, and *Eucalyptus tereticornis*. *Bioresources*, vol. 6, no. 4, pp. 5062-5073. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.6.4.5062-5073>
22. Song B., Deng H., Tan L., Liu H. Fiber Structure and Basic Properties of Bamboo Pulp. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 332-334, pp. 874–877. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.332-334.874>
23. Tripathi S.K., Mishra O.P., Bhardwaj N.K., Varadhan R. Pulp and Papermaking Properties of Bamboo Species *Melocanna baccifera*. *Cellulose Chemical Technology*, 2018, no. 52, pp. 81–88. Available at: [https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2\(2018\)/p.81-88.pdf](https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2(2018)/p.81-88.pdf)
24. Wai N.N., Nanko H., Murakami K. A Morphological Study on the Behavior of Bamboo Pulp Fibers in the Beating Process. *Wood Science and Technology*, 1985, vol. 19, no. 3, pp. 211–222. <https://doi.org/10.1007/BF00392050>

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*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-160-171

Плотность древесины сосны обыкновенной в осушаемом сосняке сфагновом

М.А. Загородский^{1,2}, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5942-4452>

С.В. Третьяков^{1,2}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

С.В. Коптев^{1,2}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; lespro@bk.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru[✉]

²Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062

Поступила в редакцию 11.01.22 / Одобрена после рецензирования 18.04.22 / Принята к печати 21.04.22

Аннотация. Задача повышения продуктивности лесов была и остается одной из самых актуальных для Европейского Севера России, особенно в период завершения пионерного освоения лесных массивов. На Европейском Северо-Востоке наблюдается избыточная влажность при достаточно низких средних температурах, которые не способствуют активному поверхностному испарению влаги. В XX в. здесь на больших площадях проведены гидротехнические мелиорации, что способствовало повышению общей продуктивности лесов. Отношение к осушению лесов со стороны защитников экологии неоднозначное. Странники сохранения ненарушенных лесных территорий стараются противодействовать подобным мероприятиям. В то же время выращивание высокопродуктивных лесов нужного состава и качества требует мер содействия естественному возобновлению или создания лесных культур. Кроме общей продуктивности насаждений важным вопросом при проведении гидроресомелиорации является качество древесины, которое во многом определяется такими показателями, как ее плотность, соотношение доли ранней и поздней древесины. Для того чтобы изучить влияние разнообразия рельефа осушаемых лесных участков на качество древесины материал исследований рассматривали отдельно для 3 наиболее типичных групп микрорельефа: ровные участки, повышения, переходные участки. При избыточном увлажнении наблюдается гибель всходов и созданных лесных культур (вымокание, выдавливание морозом и т. д.). Создание микроповышений и отведение излишней влаги могут гарантировать восстановление и выращивание высокопродуктивных лесов. Установлены различия в плотности древесины сосны до и после проведения гидротехнических мелиораций в зависимости от положения в рельефе. Наибольшие изменения этого показателя осушение повлекло у деревьев, расположенных на возвышениях и на ровных участках, – в сторону увеличения и понижения соответственно.

© Загородский М.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., 2023



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

У деревьев на ровных участках после гидролесомелиорации наблюдается некоторое превышение размеров ранней древесины над поздней, на возвышениях – увеличение среднего содержания поздней древесины.

Ключевые слова: осушаемые сосняки, гидролесомелиорация, реакция на осушение, продуктивность сосняков, качество древесины, плотность древесины, соотношение ранней и поздней древесины, положение древостоя в рельефе, ширина годичного слоя

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Рослесхоза 2022–2024 гг. «Разработка цифровой имитационной модели динамики экологического состояния и продуктивности экосистем на переувлажненных землях под воздействием природных и антропогенных факторов», регистрационный № НИОКТР 122020300230-5.

Для цитирования: Загородский М.А., Третьяков С.В., Коптев С.В. Плотность древесины сосны обыкновенной в осушаемом сосняке сфагновом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 160–171. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-160-171>

Original article

Density of Scots Pine Wood in Drained Sphagnum Pine Forest

Mikhail A. Zagorodski^{1,2}, Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5942-4452>

Sergey V. Tretyakov^{1,2}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Sergey V. Koptev^{1,2}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; lespro@bk.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru

²Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation

Received on January 11, 2022 / Approved after reviewing on April 18, 2022 / Accepted on April 21, 2022

Abstract. The task of increasing forest productivity has been and remains one of the current interests of the European North of Russia, especially after the period of primary development of the forest areas. In the European Northeast, excessive humidity is observed at rather low average temperatures, which prevents active surface evaporation. In the twentieth century, the hydrotechnical reclamations were conducted on the large areas of swampy forests that increased the total productivity. The ecologists have an ambivalent attitude concerning forest draining. The supporters, who try to protect the undisturbed forest territories, counteract such activities. At the same time, the cultivation of highly productive forests of the right composition and quality requires measures for natural afforestation, or artificial forests must be created. Besides the total productivity of the stands, wood quality is an important factor in the hydroamelioration. It is mainly determined by density and the ratio between early and late wood. The influence of the landscape peculiarities of the drained forests on the quality of the wood was examined by the devotion of the areas according to the most typical groups of microrelief: flat areas, elevations, transitional areas. In cases of extensive humidity, the

death of seedlings and artificial forest plantings was observed (soaking, frost extrusion, etc.). The creation of micro-elevations and the drainage of the excessive moisture guarantee the regeneration and establishment of the highly productive forests. The differences in the density of pine wood before and after the hydrotechnical reclamation were detected according to the landscape. The largest changes in the indicator were determined at the elevations and the flat areas, with the increase and the decrease, respectively. The trees that grow on the flat terrain after the reclamation show a relative excess of early wood over late wood, while at the elevations the presence of the late wood is predominant.

Keywords: drained pine forests, hydrotechnical reclamation, response to draining, pine forest productivity, wood quality, wood density, ratio of early and late wood, stand position in landscape, width of annual layer

Acknowledgments: The work was performed within the framework of the state assignment from the Federal Forestry Agency of the Russian Federation (Rosleskhoz) within 2022–2024 period: “Development of a Digital Simulation Model of the Dynamics of the Ecological State and Productivity of Ecosystems on Waterlogged Lands Under the Influence of Natural and Anthropogenic Factors”, registration No. NIOKTR 122020300230-5.

For citation: Zagorodski M.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V. Density of Scots Pine Wood in Drained Sphagnum Pine Forest. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 160–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-160-171>

Введение

На Европейском Севере России избыточное увлажнение является одним из главных препятствий роста и формирования высокопродуктивных насаждений. В целом в указанном регионе заболоченность лесного фонда составляет до 39 %. Гидротехническая мелиорация в комплексе с лесоводственными мероприятиями при правильно выбранном объекте осушения – один из самых радикальных и действенных способов повышения продуктивности лесных насаждений и качества выращиваемой древесины. В результате проведения гидролесомелиорации изменяется гидрологический режим таежной экосистемы, что приводит к повышению продуктивности лесных насаждений. Но лесные насаждения реагируют на осушение по-разному и даже в пределах одного таксационного выдела могут быть различные результаты в зависимости от микрорельефа. В пределах объекта осушения встречаются участки с микроповышениями и микропонижениями рельефа. В зависимости от местоположения в рельефе формируются разные условия роста растений и проявляется различная реакция на осушение.

Одним из важнейших и недостаточно изученных вопросов является изменение плотности древесины в результате проведения гидротехнической мелиорации на площадях с избыточным увлажнением. Плотность древесины входит в число основных показателей качества древесины, зависит от условий местопроизрастания, морфологических и анатомических характеристик деревьев [2, 3, 5–11, 14]. Результатами многочисленных исследований доказано, что с увеличением ширины годичного слоя уменьшается плотность древесины [10–12, 15–22]. Изучение изменения плотности древесины до и после проведения гидролесомелиоративных работ на избыточно-увлажненных территориях представляет интерес не только с научной точки зрения, но и имеет большое практическое значение [10–12].

Истощение лесосырьевых баз по сосновой хозсекции вызывает необходимость вовлечения в хозяйственное использование участков на переувлажненных землях. В результате гидротехнической мелиорации продуктивность таких насаждений в ряде случаев существенно возрастает и участки переходят в зимний лесосечный фонд. После рубки насаждения на слабых торфяных грунтах сильно повреждаются – неправильная эксплуатация может привести к повторному заболачиванию осушаемых участков. В связи с этим возникает необходимость исследования данных насаждений с хозяйственной и экологической точек зрения и выработки рекомендаций по их хозяйственному освоению.

Цель исследования – определение влияния гидротехнической мелиорации на качество древесины сосны в сосняке сфагновом путем оценки ее плотности на осушаемых землях и в различных формах рельефа.

Объекты и методы исследования

Для изучения вопроса влияния гидротехнической мелиорации на качество древесины сосны обыкновенной, относительно месторасположения деревьев в микрорельефе, в 2020 г. были проведены исследования на объекте осушения под номером 1-32-67 (331) в кварталах 16, 17 Новодвинского участкового лесничества Архангельского лесничества Архангельской области. Объект площадью 2524 га сдан в эксплуатацию в 1975 г., а в 1990 г. реконструирован на площади 1333 га.

Изучена реакция на осушение отдельных деревьев сосны обыкновенной относительно месторасположения в микрорельефе. Высказано предположение, что деревья, произрастающие на микроповышениях, в результате осушения оказываются в условиях произрастания, отличных от условий равнинной части одного и того же насаждения при прочих равных условиях.

Заложено 12 пробных площадей (ПП) в осушаемых сосновых насаждениях III–IV классов возраста в сфагновом и долгомошном типах леса. ПП заложены длинной стороной вдоль каналов на расстоянии 10 м от них. Осушители отдалены друг от друга на 50 м, глубина каналов – 0,9–1,1 м.

Таксационные показатели устанавливали общепринятыми в лесной таксации методами [1, 8]. Исследовано 252 модельных дерева, у которых определяли высоту, диаметр, а также для изучения изменения плотности древесины сосны до и после проведения гидролесомелиоративных работ на каждой ПП возрастным буровым перпендикулярно осушителям производили отбор 21 керна. Керна взяты на высоте 1,3 м. Обследование образцов проведено в камеральных условиях. Величину радиального прироста получали измерителем параметров керна Corim Max1 (точность прибора – 0,01 мм). Обработку полевых материалов производили с помощью стандартного пакета Microsoft Office и интегрированного пакета Statistica. Средняя таксационная характеристика сформировавшихся при гидролесомелиоративном воздействии насаждений приведена в табл. 1.

При определении радиального прироста выделяли раннюю и позднюю древесину. Работы по осушению в районе исследования выполняли в 1975 г., поэтому радиальный прирост после проведения гидролесомелиоративных работ устанавливали за период с 1975 до 2020 г. и за 10 лет до начала осушения.

Таблица 1

Средние таксационные показатели насаждений, сформировавшихся при гидросомелиоративном воздействии
Average taxonomic indicators of stands developed under hydrotechnical reclamation impact

№ ПП/площадь, га	Бонитет	Состав	Тип леса	Порода	Количество деревьев на 1 га	Средние			G, м ³ /га	Полнога	Запас древесины, м ³ /га	
						A, лет	H, м	D, см			растущего	сухого
1/0,14	V	52С48С	С сф	С	1345	60	9,4	8,4	7,4	0,3	38	15
					124	200	11,5	24,5	5,8	0,2	35	–
<i>Итого</i>					1469	–	–	–	13,2	0,5	73	15
2/0,14	IV	72С25С3Е	С сф	С	1418	60	11,0	11,2	14,1	0,6	85	18
				С	87	200	14,2	24,9	4,2	0,1	30	–
				Е	73	60	9,8	9,4	0,5	–	3	–
<i>Итого</i>					1578	–	–	–	18,8	0,7	118	18
3/0,13	IV	69С15С9Е7Б	С сф	С	1552	70	12,6	13,5	22,2	0,8	155	22
				С	56	150	17,3	29,8	3,9	0,1	33	–
				Е	360	60	10,3	10,6	3,1	0,15	19	–
				Б	288	55	12,1	10,4	2,4	–	16	–
<i>Итого</i>					2256	–	–	–	31,6	1,05	223	22
4/0,14	V	81С19С	С сф	С	1470	70	10,8	11,1	14,3	0,6	85	17
				С	43	150	14,0	29,2	2,9	0,1	20	–
				–	1513	–	–	–	–	17,2	0,7	105
<i>Итого</i>					894	60	11,5	12,8	11,5	0,5	73	26
5/0,22	IV	72С28С	С сф	С	65	200	15,0	27,5	3,9	0,1	29	–
				–	959	–	–	–	–	15,4	0,6	102
<i>Итого</i>					959	–	–	–	15,4	0,6	102	26

6/0,16	V	78С22С	С сф	С	1290	60	9,8	11,2	12,8	0,6	70	10
			<i>Итого</i>	С	50	200	13,1	27,5	3,0	0,1	20	–
7/0,19	IV	87С13С	С сф	С	1340	–	–	–	15,8	0,7	90	10
			<i>Итого</i>	С	1974	70	12,2	11,9	21,9	0,8	140	25
8/0,13	III	75С25Б	С дм	Б	52	140	15,0	26,5	2,9	0,1	21	–
			<i>Итого</i>	–	2026	–	–	–	24,8	0,9	161	25
9/0,10	III	85С15Б	С дм	С	1133	80	19,5	19,1	32,3	0,9	308	22
			<i>Итого</i>	Б	958	55	16,5	12,5	11,7	0,4	101	14
10/0,20	V	64С36С	С сф	С	2091	–	–	–	44,0	1,3	409	36
			<i>Итого</i>	С	1684	80	17,8	16,7	36,9	1,1	331	48
11/0,15	V	89С7С4Б	С сф	Б	582	55	16,0	12,4	7,1	0,2	60	1
			<i>Итого</i>	–	2266	–	–	–	44,0	1,3	391	49
12/0,15	V	70С28С2Б	С дм	С	964	70	9,2	11,4	9,9	0,4	51	20
			<i>Итого</i>	С	112	140	11,5	23,6	4,9	0,2	29	–
			<i>Итого</i>	–	1076	–	–	–	14,8	0,6	80	20
			<i>Итого</i>	С	1305	80	13,5	14,4	21,1	0,7	148	12
			<i>Итого</i>	С	20	140	16,4	29,5	1,3	–	11	–
			<i>Итого</i>	Б	118	60	10,2	12,0	1,3	0,1	7	–
			<i>Итого</i>	–	1443	–	–	–	23,7	0,8	166	12
			<i>Итого</i>	С	1165	80	13,6	14,4	19,0	0,7	136	11
			<i>Итого</i>	С	129	140	16,7	25,5	6,6	0,2	54	–
			<i>Итого</i>	Б	91	60	8,8	9,6	0,7	–	3	–
			<i>Итого</i>	–	1385	–	–	–	26,3	0,9	193	11

Примечание: С сф, С дм – сосняк сфагновый и долгомошный соответственно; А – возраст; Н – высота; D – диаметр; G – сумма площадей сечений на высоте 1,3 м.

Результаты исследований других авторов [4, 7, 19, 20] подтверждают существование связи между плотностью древесины, шириной годичного слоя и процентным содержанием поздней древесины у хвойных пород. Базисную плотность древесины до и после гидролесомелиоративных работ определяли разработанным Г.А. Чибисовым, С.А. Москалевой, Л.Е. Крыжановской экспресс-методом, основанным на обширном теоретическом и практическом материале. Для нахождения плотности древесины этими авторами получено эмпирическое уравнение связи данного показателя (P) с шириной годичных слоев (S) и процентом содержания поздней древесины (Bd) [13]:

$$P = 279,3 - 10,8S + 4,9Bd.$$

Точность уравнения составляет 0,7–4,8 %. Достоверность различий средних параметров уравнения снижается с увеличением содержания поздней древесины (более 30 %) [13].

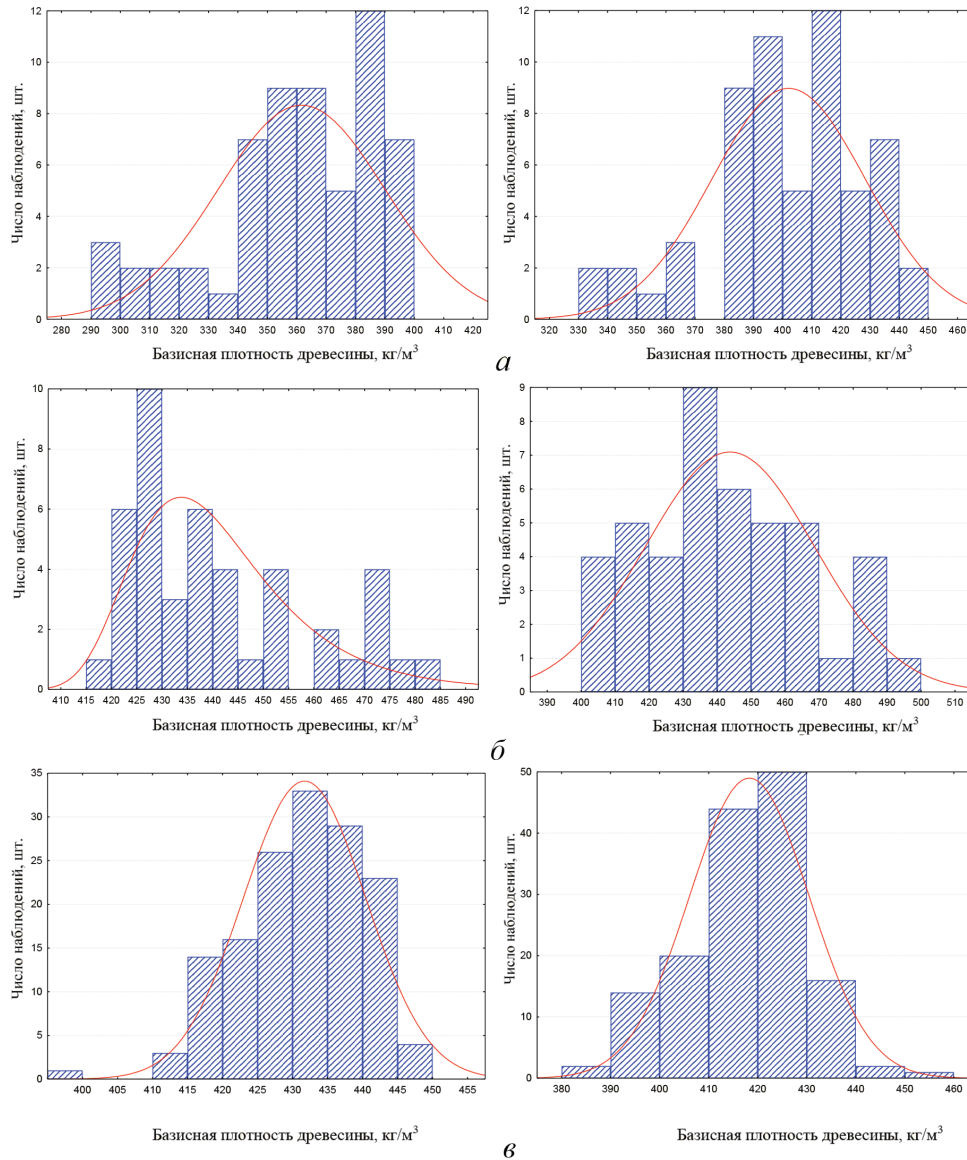
Для изучения реакции отдельных деревьев на осушение выделены 3 категории относительно месторасположения в рельефе: «на возвышении» (59 моделей), «на переходе» (44 модели) и «на ровном участке» (49 моделей). Возвышения не превышают 1,5 м, представляют собой островные группы деревьев, занимающие площадь до 20–50 м², или 4–6 % от площади участка; подстилаются минеральным горизонтом; почвообразование идет по подзолистому типу. Участки переходного типа подстилаются торфами мощностью до 0,5 м; ровные – торфами мощностью 0,5–1,5 м.

Выборочные совокупности проверены на нормальность распределения. Показатели асимметрии выборок изменяются в пределах от –0,75 до +0,86, эксцесса – от –0,68 до +0,30. Точность опыта находится в пределах 0,06–0,85. Коэффициент изменчивости варьирует от 2,0 до 7,8 %. Для проверки достоверности различий между выборками использовали критерий Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

Показатели плотности древесины на объекте исследования, полученные по приведенной формуле, представлены на рисунке. Средние показатели элементов макроструктуры и базисной плотности древесины сосны на объекте исследования до и после осушения приведены в табл. 2.

Из сравнения базисной плотности древесины сосны до и после проведения гидролесомелиоративных работ следует вывод, что у моделей на возвышениях плотность после осушения выше, чем до осушения. У образцов на ровных участках наблюдается достоверное снижение плотности по отношению к плотности до начала осушения. У образцов на переходах к ровным участкам нет достоверного различия. Достоверные различия плотности древесины до и после осушения наблюдаются на возвышениях и на ровных участках для всех уровней вероятности безошибочных прогнозов. Приведенные в табл. 2 показатели плотности древесины превышают среднестатистическую плотность древесины сосны по Архангельской области – 395±15 кг/м³ [6], что свидетельствует о формировании высококачественной древесины в осушаемых сосняках в Новодвинском участковом лесничестве Архангельского лесничества.



Распределение числа деревьев по базисной плотности древесины до (слева) и после (справа) осушения: *a* – на возвышениях; *б* – на переходных участках; *в* – на ровных участках
 Distribution of trees quantity according to the reference wood density before (left) and after (right) drainage: *a* – at elevations; *б* – on transitional areas; *в* – on flat landscape

В табл. 3 показано распределение деревьев на осушаемых участках по плотности древесины.

В результате проведенных исследований установлено, что гидролесомелиоративные работы в целом положительно влияют на качество формируемых насаждений. Распределение плотности древесины по грациям показывает, что наибольшие изменения осушение повлекло у деревьев, расположенных на возвышениях, – в сторону увеличения и на ровных участках – в сторону понижения. На переходных участках базисная плотность древесины в среднем не поменялась, но значительно увеличилась дисперсия. Средняя ширина годично-

го слоя у моделей на переходах и на ровных участках после осушения увеличилась на 57 и 178 % соответственно. Такая динамика прироста объясняется улучшением водно-воздушного режима. У моделей на возвышениях наблюдается обратный эффект, после проведения гидролесомелиоративных работ средняя ширина годичного слоя снизилась на 35 %, что вызвано чрезмерным оттоком влаги из корнеобитаемого слоя.

Таблица 2

Средние показатели ($M \pm m$) элементов макроструктуры и базисной плотности древесины сосны на объекте исследования до и после осушения

Mean values ($M \pm m$) of macrostructure components and reference densities of pine wood measured at the trail plots before and after drainage

Месторасположение относительно рельефа	Ширина годичного слоя, мм	Содержание поздней древесины, %	Базисная плотность, кг/м ³	t-критерий Стьюдента
<i>До осушения</i>				
На возвышениях	0,91±0,06	24,03±1,38	361±3,7	8,2
На переходах	0,45±0,02	34,38±3,78	442±2,7	0,2
На ровных участках	0,32±0,01	31,92±3,23	432±0,7	12,3
<i>После осушения</i>				
На возвышениях	0,59±0,03	26,28±1,16	402±3,4	8,2
На переходах	0,71±0,02	34,85±4,29	443±3,7	0,2
На ровных участках	0,89±0,03	30,23±3,73	418±0,9	12,3

Примечание: Полужирным выделены достоверные различия критерия Стьюдента.

Таблица 3

Распределение численности деревьев по плотности древесины сосны на участках до и после осушения, % от числа деревьев

Distribution of trees quantity by pine wood density on the trail plots before and after drainage, % from the total number of trees

Плотность древесины, кг/м ³	До осушения			После осушения		
	на возвышениях	на переходах	на ровных участках	на возвышениях	на переходах	на ровных участках
281–300	5,1	–	–	–	–	–
301–320	6,8	–	–	–	–	–
321–340	5,1	–	–	3,4	–	–
341–360	27,1	–	–	5,1	–	–
361–380	23,7	–	–	5,1	–	–
381–400	32,2	–	0,7	33,9	–	10,7
401–420	–	2,3	11,4	28,8	20,5	43,0
421–440	–	56,8	69,8	20,3	29,5	44,3
441–460	–	20,4	18,1	3,4	25,0	2,0
461–480	–	18,2	–	–	13,6	–
481–500	–	2,3	–	–	11,4	–

Средний процент содержания поздней древесины у моделей на возвышениях после проведения осушения увеличился на 9,4 %. У деревьев на переходах доля поздней древесины осталась на прежнем уровне (рост на 1,4 %).

На ровных участках отмечено снижение среднего процента содержания поздней древесины на 5,3 %. Данное явление можно объяснить значительным увеличением радиального прироста после проведения гидроресомелиоративных работ и образованием ранней древесины более высокими темпами, чем поздней.

Заключение

Исследование позволило выявить заметное влияние гидротехнической мелиорации на качество древесины сосны и его зависимость от условий места произрастания. Установлено изменение плотности древесины после проведения гидроресомелиоративных работ в сфагновом сосняке относительно месторасположения деревьев в рельефе. Существенные изменения средней ширины годичного слоя произошли у деревьев, произрастающих на переходных и на ровных участках. Проведение гидроресомелиоративных работ обусловило следующие изменения таксационных показателей изученных древостоев:

ширина годичных слоев увеличилась на 57,8...178,1 % вследствие улучшения водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя, у деревьев, произрастающих на возвышениях, средняя ширина годичного слоя снизилась на 35,2 %, что вызвано чрезмерным оттоком влаги из корнеобитаемого слоя;

плотность древесины на возвышениях и переходных участках увеличилась до $402 \pm 3,4 \dots 443 \pm 3,7$ км/м³;

наблюдается некоторое превышение размеров ранней древесины над поздней у деревьев, произрастающих на ровных участках, у деревьев на возвышениях средний процент содержания поздней древесины увеличился на 9,4 %, что способствовало росту плотности древесины, у деревьев на переходах он практически не изменился – 1,4 %.

Проведенные исследования позволяют оценить степень воздействия осушительной мелиорации на деревья в зависимости от их положения в рельефе и будут использованы при моделировании динамики экологического состояния осушаемых насаждений. В ходе дальнейших исследований предполагается установить закономерные связи роста осушаемых насаждений различных условий места произрастания с экологическими и антропогенными факторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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.).
2. Бабиков Б.В. Влияние канав на уровень грунтовых вод и рост леса на торфяных почвах // Материалы Науч.-техн. конф. Л.: ЛТА, 1966. № 6. С. 70–74.
Babikov B.V. Impact of Ditches on Groundwater Level and Forest Growth on Peat Soils. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference*. Leningrad, LTA Publ., 1966, no. 6, pp. 70–74. (In Russ.).
3. Бабиков Б.В. Гидротехнические мелиорации. 4-е изд., стер. СПб.: Лань, 2005. 304 с.
Babikov B.V. *Hydrotechnical Reclamations*. Sankt Petersburg, Lan' Publ., 2005. 304 p. (In Russ.).
4. Константинов В.К. Эффективность осушения, рациональное использование и охрана от пожаров лесных земель // Вестн. МАНЭБ. 2016. Т. 21, № 1. С. 24–33.

Konstantinov V.K. Drainage Efficiency, Sustainable Use and Fire Protection of Forest Lands. *Vestnik MANEB*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 24–33. (In Russ.).

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

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

6. Пахучий В.В. Факторы продуктивности осушенных насаждений Европейского Северо-Востока. Сыктывкар: Коми НЦ УрО АН СССР, 1991. 114 с.

Pakhuchiy V.V. *Productivity Factors of Drained Stands in the European Northeast*. Syktyvkar, Komi Scientific Center of Ural Branch of RAS Publ., 1991. 114 p. (In Russ.).

7. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ, 1976. 160 p. (In Russ.).

8. Рубцов В.Г., Кнize А.А. Закладка и обработка пробных площадей в осушенных насаждениях. Л.: ЛенНИИЛХ, 1974. 56 с.

Rubtsov V.G., Knize A.A. *Establishment and Processing of Trial Plots in Drained Stands*. Leningrad, LenNIILKh Publ., 1974. 56 p. (In Russ.).

9. Смирнов А.П. Причины различной эффективности гидромелиорации верховых болот // Лесн. хоз-во. 1986. № 2. С. 32–35.

Smirnov A.P. Reasons for Differences in Reclamation Effectiveness of Peat Bogs. *Lesnoye khozyaystvo*, 1986, no. 2, pp. 32–35. (In Russ.).

10. Тараканов А.М. Рост осушаемых лесов и ведение хозяйства в них. Архангельск: СевНИИЛХ, 2004. 228 с.

Tarakanov A.M. *Growth of Drained Forests and Their Maintenance*. Arkhangelsk, FBU "NRIF" Publ., 2004. 228 p. (In Russ.).

11. 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>

12. Федотов И.В., Третьяков С.В., Ильинцев А.С. Влияние гидротехнической мелиорации на качество древесины сосны // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 214. С. 131–140.

Fedotov I.V., Tretyakov S.V., Ilintsev A.S. The Hydraulic Impact of Land Reclamation on the Quality of Pine Wood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2016, iss. 214, pp. 131–140. (In Russ.).

13. Чибисов Г.А., Москалева С.А., Крыжановская Л.Е. Качество древесины сосны и ели, метод его определения // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере: сб. науч. тр. Архангельск: СевНИИЛХ, 2005. С. 89–99.

Chibisov G.A., Moskaleva S.A., Kryzhanovskaya L.E. The Quality of Pine and Spruce, the Method for Determination. *The Issues of the Taiga Forest Management in the European North: A Collection of Scientific Articles*. Arkhangelsk, FBU "NRIF" Publ., 2005, pp. 89–99. (In Russ.).

14. Чибисов Г.А., Москалева С.А., Крыжановская Л.Е., Личутина А.А. Влияние комплексных уходов на анатомические свойства древесины сосны // Материалы отчетной сессии по итогам НИР за 1993 г. Архангельск, 1994. С. 45–46.

Chibisov G.A., Moskaleva S.A., Kryzhanovskaya L.E., Lichutina A.A. The Influence of Complex Treatments on Anatomical Properties of Pine Wood. *Proceedings of the Research and Development Conference of 1993*. Arkhangelsk, 1994, pp. 45–46. (In Russ.).

15. Bouriaud O., Teodosiu M., Kirdyanov A.V., Wirth C. Influence of Wood Density in Tree-Ring-Based Annual Productivity Assessments and Its Errors in Norway Spruce. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, no. 20, pp. 6205–6217. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6205-2015>
16. Ciancio O., Iovino F., Menguzzato G., Nicolaci A., Nocentini S. Structure and Growth of a Small Group Selection Forest of Calabrian Pine in Southern Italy: A Hypothesis for Continuous Cover Forestry Based on Traditional Silviculture. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 224, no. 3, pp. 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.057>
17. Danilov D., Belyaeva N., Zaitcev D. Density of Wood of Pine-Tree and Spruce in the Mixed Mature Forests of the North-West Russia Boreal Zone. *Research for Rural Development*, 2018, vol. 1, pp. 125–130. <https://doi.org/10.22616/rrd.24.2018.019>
18. Danilov D., Janusz S. Macrostructure and Density of Pine and Spruce Wood on Fallow Lands on North-West of Russia. *Research for Rural Development*, 2019, vol. 1, pp. 31–37. <https://doi.org/10.22616/rrd.25.2019.005>
19. Kamala F.D., Sakagami H., Oda K., Matsumura J. Wood Density and Growth Ring Structure of Pinus Patula Planted in Malawi, Africa. *IAWA Journal*, 2013, vol. 34, no. 1, pp. 61–70. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000006>
20. Peltola H., Gort J., Pulkkinen P., Gerendiaian 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>
21. Saranpää P. Wood Density and Growth. *Wood Quality and Its Biological Basis*. Ed. by Barnett J.R., Jeronimidis G. England, Chichester, Wiley-Blackwell Publ., 2003, 240 p. Available at: <https://books.google.at/books?id=NhwSMryGzY0C>
22. Wilhelmsson L., Arlinger J., Spångberg K., Lundqvist S.-O., Grahn T., Hedenberg Ö., Olsson L. Structure and Growth of a Small Group Selection Forest of Calabrian pine in Southern Italy: A hypothesis for Continuous Cover Forestry Based on Traditional Silviculture. *For. Ecol. Manag.*, 2006, no. 224, pp. 229–234. <https://doi.org/10.1080/02827580260138080>

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

Краткое сообщение

УДК 614.841.2; 614.841.3; 614.842

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-172-182

Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций

Ю.В. Подрезов, *д-р с.-х. наук, доц.*; Researcher ID: [GPF-4864-2022](https://orcid.org/0000-0001-6807-9083),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6807-9083>

Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, ул. Давыдовская, д. 7, Москва, Россия, 121352

Поступила в редакцию 03.02.22 / Одобрена после рецензирования 10.05.22 / Принята к печати 11.05.22

Аннотация. Исследованы основные существующие на сегодняшний день проблемы борьбы с чрезвычайными лесопожарными ситуациями в организационном и техническом аспектах. Анализ проблем в области лесной пирологии на основе принципов системного подхода и методов логического анализа и синтеза протекающих процессов свидетельствует о необходимости разработки современных подходов к организации борьбы с лесными пожарами разных видов, которые нередко являются источниками чрезвычайных лесопожарных ситуаций различных масштабов. Установлено, что научно-обоснованные подходы к организации и реализации мероприятий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных лесопожарных ситуаций должны основываться на создании и функционировании адекватной системы поддержки научно-обоснованных управленческих решений. В основе такой системы должны лежать процессы организации комплексного мониторинга и прогнозирования лесопожарной обстановки, динамики и последствий лесных пожаров – источников чрезвычайных лесопожарных ситуаций различных видов – и непосредственно самих чрезвычайных лесопожарных ситуаций. Существует множество характеризующихся различной степенью эффективности, экологичности, экономичности и оперативности отработанных на практике за многолетний период способов тушения лесных пожаров. Однако анализ результативности (с точки зрения снижения количества пожаров и пройденных огнем лесных площадей) этих, как правило, традиционных способов показывает необходимость их совершенствования, а также разработки и реализации новых современных способов борьбы с лесными пожарами (прежде всего, с их поражающими факторами). Предложено снижать класс пожарной опасности погодных условий, используя экологически чистый и эффективный способ, основанный на электрофизических методах коррекции погодных условий. Данный способ и технология прошли многократную натурную экспериментальную проверку в различных географических условиях Российской Федерации и в ряде зарубежных стран. Следует отметить хорошие перспективы способа и основанных на нем технологий предупреждения и тушения крупных лесных пожаров, борьбы с поражающими факторами источников чрезвычайных лесопожарных ситуаций.

Ключевые слова: лесопожарная обстановка, лесной пожар, мониторинг лесов, прогнозирование лесных пожаров, управленческие решения, ущерб от лесных пожаров, чрезвычайная лесопожарная ситуация

Для цитирования: Подрезов Ю.В. Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 172–182. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-172-182>

Brief presentation

Principal Directions for Prevention of Emergency Fire Situations in Forests

Yury V. Podrezov, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; Researcher ID: [GPF-4864-2022](https://orcid.org/0000-0001-6807-9083),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6807-9083>

All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center for Science and High Technologies),
ul. Davydkovskaya, 7, Moscow, 121352, Russian Federation

Received on February 03, 2022 / Approved after reviewing on May 10, 2022 / Accepted on May 11, 2022

Abstract. The study investigates the central current issues in extreme forest fire extinction from organizational and technological perspectives. An analysis of the problems in the field of forest pyrology is established on the principles of systematic approach, methods of logical analysis and synthesis of ongoing processes. It indicates the need to develop modern mechanisms against forest fires of various types, which are often the origins of emergency forest fires of various scales. It has been determined that the scientifically substantiated ways of arrangement and implementation of measures for fire prevention and elimination should be supported by an adequate functioning system for scientifically based management decisions. Such a system should be grounded on the processes of the integrated fire monitoring and predicting of the forest fire situation, supervising and estimating the dynamics as well as consequences of the forest fires, their sources of various types and emergency scenarios with gradated threat scales. There are multiple fire extinguishing techniques with various productivity, environmental friendliness, cost efficiency, speed response that have been practically proven over a long period of time. Although the elevation of the results, according to the parameters of the reduced number of burns and the forest areas covered by fire, shows the need for improvement, as well as the generation and realization of the new modern methods against burns on wooded areas especially with the damaging factors. It is recommended to reduce the fire hazard class caused by weather conditions by using an environmentally compatible and efficient electrophysical principals. Such response procedures have gone through an extensive practical examination in different geographical conditions of the Russian Federation and in several foreign countries. It should be mentioned that this approach has a great potential for prevention and termination of large forest fires, reducing the damaging factors coming from the sources of emergency fire situations.

Keywords: forest fire situation, forest fire, forest monitoring, prediction forest fires, management decisions, damage form forest fires, emergency fire situations

For citation: Podrezov Yu.V. Principal Directions for Prevention of Emergency Fire Situations in Forests. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 172–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-172-182>

Введение

Лесные пожары (ЛП) являются источниками серьезной природной опасности во многих странах мира, в том числе в России с ее огромными лесными площадями. Чрезвычайные лесопожарные ситуации (ЧЛС) различных масштабов – развившиеся и трансформировавшиеся ЛП – представляют еще большую опасность для населения и территорий нашей страны [6, 7, 14, 15, 17].

Исследованию особенностей возникновения и развития различных видов ЛП посвящено множество работ ученых и специалистов из разных стран мира, прежде всего, из стран с большими лесопокрытыми площадями, включая СССР и Россию. Это труды И.С. Мелехова, Э.Н. Валендика, Н.П. Курбатского, Г.А. Доррера, R.C. Rothermel, С.Е. Van Wagner, G.M. Byram. Труды [1–4, 12, 14, 20, 22, 28, 30] стали классикой лесной пирологии. Крупных теоретических работ, посвященных исследованию особенностей возникновения и динамики именно ЧЛС различных масштабов, на базе системного подхода на данный момент насчитывается немного, хотя теория и практика лесной пирологии и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ЧС) настоятельно требуют создания и развития новых методологических подходов, новых знаний в указанной области.

Проблематика борьбы с ЧЛС представляет собой комплекс крупных научных проблем, требующих всестороннего исследования и включающих ряд базовых аспектов, касающихся мониторинга и прогнозирования, а также планирования и реализации мероприятий по предупреждению и ликвидации ЛП, прежде всего, источников ЧЛС, и в настоящее время проанализирована не полностью. На основе многолетних исследований автора целесообразно выделить направления и проблемные аспекты борьбы с ЧЛС – мониторинг, прогнозирование, планирование и реализацию мероприятий по предупреждению и ликвидации не только ЛП, но и, в первую очередь, вызываемых ими ЧЛС. От своевременности и полноты выявления источников ЧЛС (посредством лесопожарного мониторинга), от достоверности и качества прогнозирования динамики ЛП и вызываемых ими ЧЛС, планирования и последующей реализации предупредительных противопожарных мероприятий и мероприятий по борьбе с ЧЛС зависят масштабы и тяжесть последствий ЛП и вызываемых ими ЧЛС.

Подтверждением факта нерешенности ряда проблем в области лесной пирологии, защиты населения и территорий от поражающих факторов ЧЛС являются значительные площади, ежегодно проходимые в нашей стране ЛП, а также их трансформация в ЧЛС различных масштабов. Примером может служить сложная лесопожарная обстановка в Республике Саха (Якутия) летом 2021 г., когда вследствие тяжелых в лесопожарном отношении погодных условий (жара, почти полное отсутствие осадков, сильные ветра и т. п.) возникло множество ЛП, в том числе достаточно опасных и быстро распространяющихся – верховых, – которые переросли в ряд ЧЛС регионального масштаба с реагированием федерального уровня. Подобным ситуациям способствуют: ряд упущений в организации планирования и проведения предупредительных (профилактических) мероприятий и мероприятий по борьбе с ЛП и ЧЛС, отсутствие целостной межведомственной системы поддержки управленческих решений по предупреждению ЛП и борьбе с ними и вызываемыми ими ЧЛС, а также отсутствие в современной практике лесопожарных служб высокоэф-

фективных и достаточно оперативных способов и технологий борьбы с ЛП. Все это свидетельствует об актуальности исследуемой проблематики.

Цель исследования – анализ проблем борьбы с ЧЛС и путей их решения.

Для достижения цели были обозначены проблемы, которые призвана решить данная статья. В частности, среди современных актуальных проблем борьбы с ЧЛС целесообразно выделить следующие проблемы, требующие всестороннего исследования [1–30]:

комплексного мониторинга и прогнозирования лесопожарной обстановки (далее – ЛПО) на различных территориях лесного фонда и земель, не входящих в лесной фонд нашей страны;

мониторинга и прогнозирования динамики и последствий ЛП различных видов и ЧЛС;

математического моделирования динамики и последствий ЛП различных видов и вызываемых ими ЧЛС;

организации эффективной борьбы с ЛП и ЧЛС;

разработки новых эффективных и экологически чистых способов и технологий борьбы с ЛП и ЧЛС, совершенствования существующих.

Объекты и методы исследования

Анализ современных особенностей борьбы с ЧЛС позволяет сделать выводы о том, что в основе решения большинства проблем должны лежать методические подходы, обеспечивающие обоснование и научную поддержку управленческих решений по предупреждению ЧЛС и борьбе с ними с учетом динамики их источников [14, 15, 18].

Борьба с ЧЛС начинается с выявления очагов возгораний на лесной площади и заканчивается ликвидацией источника ЧЛС. Между двумя этими этапами борьба с ЧЛС проходит ряд стадий, в основе которых лежит преодоление проблем, требующих решений со стороны органов управления, ответственных за борьбу с поражающими факторами источников ЧЛС.

Результаты анализа научной лесопирологической литературы и литературы в области защиты населения и территорий от ЧС природного характера свидетельствуют о том, что динамика ЧЛС во многом определяется динамикой источников ЧЛС – ЛП [12–14].

Рассмотрение основных современных проблемных аспектов борьбы с ЧЛС показывает целесообразность выделения 2 основных направлений: необходимость адекватной организации борьбы с ЧЛС через создание системы поддержки управленческих решений и разработка эффективных экономически обоснованных, не загрязняющих окружающую среду способов и средств предупреждения и борьбы с ЛП – источниками ЧЛС.

Исследование проблемы поддержки управленческих решений при борьбе с ЧЛС свидетельствует о том, что в основе такой поддержки должно лежать моделирование динамики источников ЧЛС – ЛП различных видов. Известны различные виды классификаций ЛП. Наиболее признанная классификационная схема выделяет низовые, верховые и подстилочные (лесоторфяные) ЛП. Именно эти разновидности ЛП являются, в зависимости от своей динамики, источниками ЧЛС различных масштабов. Каждый ЛП имеет особенности развития, что связано как со средой его распространения, так и с условиями, в которых он

действует и развивается. Для эффективной борьбы с указанными источниками ЧЛС необходимо предвидеть их динамику и последствия, отсюда вытекает проблема адекватного моделирования и прогнозирования динамики и последствий ЧЛС. Последнее возможно посредством использования ряда современных и классических методов: системного подхода; анализа и синтеза процессов; логического, вероятностного и статистического моделирования; математической статистики; факторного анализа; исследования операций; экспертных оценок; экспериментальных методов и ряда других [7–9, 12–17, 24–27].

Поскольку область исследования проблем борьбы с ЧЛС достаточно обширна и предполагает изучение динамики их источников – ЛП различных видов, которые являются стохастическими процессами, а также непосредственно моделирования динамики и последствий ЧЛС, то в каждом конкретном случае исследователь выбирает метод исследования в зависимости от конкретной решаемой задачи: возможны разработка аналитических, статистических, вероятностных, логических (в том числе на основе булевой алгебры) и ряда других математических моделей, а также применение факторного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Как показывают материалы выполненного на основе методов системного и логического анализа исследования, научная поддержка управленческих решений при организации борьбы с ЧЛС должна базироваться на результатах математического моделирования, в том числе с использованием комплекса динамических математических моделей, описывающих динамику различных видов ЛП, а также на комплексе динамических математических моделей, характеризующих последствия ЛП.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что в основе выбора метода исследования лежит необходимость адекватного моделирования с точки зрения как полноты, так и точности описания моделируемого процесса. При разработке прогнозных моделей требуется учитывать возможности сбора мониторинговых данных, которые будут использоваться в указанных моделях.

Анализируя процесс моделирования динамики ЧЛС, следует рассматривать моделирование динамики ЛП и их последствий, причем ЛП различных видов, так как каждый вид имеет свои особенности распространения. Общим для всех видов ЛП при разработке моделей для систем поддержки управленческих решений при организации борьбы с ЧЛС является необходимость выбора характеристики (параметра) пожара, которая должна лежать в основе моделирования динамики и последствий ЧЛС. Результаты исследований показывают, что в качестве такой достаточно интегральной характеристики или параметра ЛП следует рассматривать динамику его площади или периметра. Подобный подход использован в ряде лесопирологических исследований автора статьи [12–14].

Моделирование последствий ЧЛС представляет собой крупную сложную научную проблему, в основе которой лежит моделирование динамики ЛП и других поддающихся оценке составляющих последствий, иначе говоря, моделирование динамики ущерба, наносимого поражающими факторами ЛП.

В литературе, посвященной проблематике лесной пирологии, уделено к настоящему времени недостаточное внимание проблематике оценки ущерба при ЧЛС.

Как показывают результаты исследований, для поддержки и обоснования управленческих решений необходимо моделировать в общем случае величину всех составляющих ущерба: экономической, социальной, экологической – и общую (суммарную) величину ущерба. Нанесение ущерба при ЧЛС возможно при воздействии поражающих факторов источников таких ЧС на населенные пункты, объекты экономики и объекты окружающей природной среды. При ЛП лес теряет способность выполнять основные функции: экономическую (сырьевую), средозащитные (водоохранную и водорегулирующую, санитарно-гигиеническую, почво- и полезащитную), рекреационную – при этом уничтожаются или количественно сокращаются пищевые, лекарственные, технические и минеральные ресурсы [12–14].

В общем случае экономический ущерб складывается из потерь основных фондов и убытков пользователей (недобор прибыли). Ущерб, наносимый основным фондам экономики, в специальной литературе определяется как потери, ущерб оборотным фондам (затраты на превентивные и аварийно-спасательные, восстановительные (включая ремонтные) работы), а также недополучение прибыли предприятиями и организациями относятся к убыткам [12, 14].

Методически важно указать на то, что экономический ущерб включает ущерб от снижения или прекращения сырьевой функции леса и производственный ущерб (ущерб объектам экономики и обороны). Ущерб от снижения и прекращения сырьевой функции леса – это ущерб от потерь древесины и дров, а также недревесной продукции леса: грибов, ягод, пищевых продуктов, орехов, лекарственных, технических, кормовых трав, кустарников, живицы и т. п. [12, 14]. В производственный ущерб (ущерб объектам экономики) входит ущерб от уничтожения или повреждения промышленных и сельскохозяйственных зданий, сооружений и построек; готовой продукции, полуфабрикатов и сырья; промышленного и сельскохозяйственного оборудования, техники и аппаратуры; сельскохозяйственных животных и птиц, посевов, растений и т. п. Сюда в ряде случаев относят ущерб объектам обороны [12, 14].

При определении величины ущерба при ЧЛС целесообразно учитывать комплекс затрат, связанных с применением сил и средств, питанием работающих, их медицинским обеспечением, почтовыми расходами, организацией отдыха и проживания и т. п. [12, 14].

Составляющие социального ущерба, которые могут быть оценены, включают ущерб от причинения вреда жизни и здоровью людей; от повреждения или уничтожения жилых домов и построек населения, посевов и растений на приусадебных участках; уничтожения домашнего скота и птицы. Ряд факторов при этом трудно оценить в стоимостном выражении. Это ухудшение состояния здоровья населения, снижение продолжительности жизни и сроков трудовой деятельности, стрессовые состояния и т. п. К социальному ущербу необходимо относить и снижение или потерю рекреационных функций леса [12, 14].

Ущерб при ЧЛС, как и при ЧС других видов, можно разделить на прямой и косвенный. Прямой ущерб при ЧЛС складывается из потерь базиса производства – потерь древесины, государственных и коммерческих промышленных и

сельскохозяйственных предприятий, населения, величины экологического и социального ущерба. Прямой ущерб, как правило, можно оценить или спрогнозировать более или менее точно и полно. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для поддержки управленческих решений принципиально важно, чтобы ущерб оценивался в стоимостном выражении, например в рублях. Косвенный ущерб – это ущерб, наносимый предприятиям и организациям, населению, находящемуся вне зоны прямого воздействия поражающих факторов ЛП. Косвенный ущерб является следствием прямого ущерба.

Оценка ущерба при ЧЛС, в том числе и прогнозная, диктуется, прежде всего, прикладными требованиями. В одних ситуациях необходима наиболее полная и точная оценка ущерба, в других – оперативные или ориентировочные прогнозные оценки, пригодные для адекватной поддержки и обоснования управленческих решений по борьбе с ЧЛС.

По результатам проведенных исследований следует сделать вывод о том, что критериями по отнесению ЛП к ЧЛС, необходимыми для принятия решений по борьбе с ЧЛС, являются [12, 14]: угроза жизни или гибель людей, нарушение нормальных условий жизнедеятельности и угроза здоровью людей, угроза уничтожения (или уничтожение) важнейших объектов экономики (включая объекты обороны), ущерб при воздействии поражающих факторов источника ЧЛС на окружающую природную среду (лес, продукты побочного и прижизненного пользования и т. д.). Первые два критерия целесообразно относить к социальным, 3-й – к экономико-социальным, 4-й – к экономико-эколого-социальным.

В основе принятия управленческих решений должны лежать следующие принципы [12–14]:

безусловной защищенности людей при ЧЛС, т. е. необходимость защитить людей независимо от величины затрат на проведение мероприятий по защите;

безусловной защищенности важнейших объектов экономики, т. е. защита объектов, имеющих ключевое значение для развития экономики страны и поддержания ее обороноспособности (иначе говоря, критически важных объектов разных уровней);

экономической целесообразности выполнения мероприятий по ликвидации ЧЛС.

Для создания и функционирования системы поддержки управленческих решений по борьбе с ЧЛС помимо комплексов согласованных между собой математических моделей для прогнозирования динамики и последствий ЧЛС необходима их программно-техническая реализация на основе современных быстродействующих персональных ЭВМ, объединенных в вычислительную сеть. Такая сеть должна функционировать на единых программных продуктах с возможностью получения требуемой мониторинговой информации (метеорологической, статистической и т. п.) в реальном (или квазиреальном – близком к реальному) режиме времени для обеспечения более достоверных и точных результатов прогнозирования. Кроме того, должны быть созданы центры обработки мониторинговой и прогнозной информации (возможно, межведомственные) с целью организации работы с получаемыми данными, их анализа, выработки необходимых управленческих решений и рекомендаций, а также оперативного доведения ее потребителям, непосредственно реализующим меры по борьбе с ЧЛС [12–14].

Таким образом, в целях адекватной и обоснованной в научном плане (на принципах системного подхода) поддержки управленческих решений при организации борьбы с ЧЛС целесообразно создание прогнозных моделей, в которых выходные данные моделей, касающиеся динамики непосредственно самого опасного процесса (ЛП), являются входными для прогнозирования ущерба при ЧЛС в его динамике.

Для обоснования решений органами управления или лицами, принимающими решения, необходимы как математические модели прогнозирования ущерба при ЧЛС для его оперативной оценки, например экспресс-модели, так и более точные и «подробные» модели для оценки всех составляющих ущерба, а также суммарного ущерба при ЧЛС.

В теории и практике борьбы с ЧЛС важной (базовой) составляющей являются способы, средства и технологии борьбы непосредственно с источниками ЧЛС. К настоящему времени в распоряжении лесопожарных служб и подразделений есть способы и технологии, основа которых – воздействие на огонь ЛП различными механическими средствами, водой, огнетушащими составами с добавками, а также искусственными осадками, вызываемыми при помощи химических реагентов. Характерными для всех указанных способов и технологий недостатками являются их невысокая эффективность и отсутствие оперативности борьбы с ЛП, сложность использования для проведения предупредительных мероприятий, дороговизна реализации.

Вместе с тем результаты проведенных исследований, учет данных анализа многолетнего опыта борьбы с ЛП различных видов показывают необходимость решения крупной научно-прикладной проблемы по разработке новых современных эффективных экологически чистых способов и технологий борьбы с источниками ЧЛС – ЛП различных видов, а также относительно недорогих способов и технологий предупреждения возникновения ЛП. Наиболее полезными с точки зрения затрат на тушение ЛП и уменьшения потенциального ущерба при ЧЛС являются способы и технологии, основанные на предварительном увлажнении лесных горючих материалов искусственными осадками на лесных площадях, равных по размерам средним лесничествам, при 4-м и 5-м классах пожарной опасности погодных условий (по критерию Нестерова). Указанные способы и технологии целесообразно применять и для тушения лесных пожаров, в том числе крупных, включая верховые. Данные способы и технологии разработаны и прошли натурную экспериментальную проверку в МЧС России в прошедшие годы, показав положительные результаты [12–14].

Заключение

В процессе проведенного исследования впервые был выполнен в организационном и техническом аспектах комплексный анализ базовых научно-прикладных проблем, существенно влияющих на результативность борьбы с поражающими факторами источников чрезвычайных лесопожарных ситуаций различных видов – лесных пожаров.

Сделан вывод о том, что причиной ряда недостатков в работе по борьбе с лесными пожарами является отсутствие на данный момент: целостной эффективной системы оперативной поддержки и научного обоснования управленче-

ских решений, принимаемых органами управления, ответственными за борьбу с чрезвычайными лесопожарными ситуациями, базирующейся на адекватном математическом моделировании, оперативном сборе и использовании в процессе прогнозирования достоверных исходных (мониторинговых) данных и современных средствах их обработки; эффективных и экологически чистых способов и технологий предупреждения и борьбы с различного вида источниками чрезвычайных лесопожарных ситуаций, широко применяемых на практике.

Исследование позволило разработать, обосновать и кратко описать конкретные направления решения, в научном и техническом аспектах, вышеуказанных проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арцыбашев Е.С. Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 87 с. Режим доступа: <https://www.booksite.ru/fulltext/arcybash/text.pdf> (дата обращения: 12.09.22).
Artsybashev E.S. *Extinguishing Forest Fires by Artificially Induced Precipitation from Clouds*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 87 p. (In Russ.).
2. Вакуров А.Д. Лесные пожары на Севере. М.: Наука, 1975. 100 с. Режим доступа: <http://www.forestforum.ru/info/history/vakurov.pdf> (дата обращения: 12.09.22).
Vakurov A.D. *Forest Fires in the North*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 100 p. (In Russ.).
3. Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А. Крупные лесные пожары. М.: Наука, 1979. 198 с. Режим доступа: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/krupn/text.pdf> (дата обращения: 12.09.22).
Valendik E.N., Matveyev P.M., Sofronov M.A. *Large Forest Fires*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 198 p. (In Russ.).
4. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 161 с.
Dorrer G.A. *Mathematical Models of Forest Fire Dynamics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 161 p. (In Russ.).
5. Горелова В.Л., Мельникова Е.Н. Основы прогнозирования систем. М.: Высш. шк., 1986. 288 с.
Gorelova V.L., Melnikova E.N. *Fundamentals of Systems Prediction*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 288 p. (In Russ.).
6. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1992. 405 с.
Grishin A.M. *Mathematical Modeling of Forest Fires and New Ways to Fight Them*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 405 p. (In Russ.).
7. Лисичкин В.А. Теория и практика прогностики. Методологические аспекты. М.: Наука, 1972. 224 с.
Lisichkin V.A. *Theory and Practice of Forecasting. Methodological Aspects*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 224 p. (In Russ.).
8. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1977. 591 с.
Martino J. *Technological Forecasting*. Moscow, Progress Publ., 1977. 591 p. (In Russ.).
9. Мелехов И.С. Лесные пожары и борьба с ними. М.: Кн. по Требованию, 2012. 81 с.
Melekhov I.S. *Forest Fires and Their Suppression*. Moscow, Kniga po Trebovaniyu Publ., 2012. 81 p. (In Russ.).
10. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2010. 282 с.

Perminov V.A. *Mathematical Modeling of Crown and Large Forest Fires Occurrence*: Dr. Phys.-Math. Sci. Diss. Tomsk, 2010. 282 p. (In Russ.).

11. Поддубный А. Расчет экономического эффекта от внедрения системы автоматизации // Antegra consulting. Режим доступа: http://www.antegra.ru/news/experts/_det-experts/4/ (дата обращения: 12.09.22).

Poddubnyy A. Calculation of the Economic Effect from the Automation System Implementation. *Antegra Consulting*: Digital source. (In Russ.).

12. Подрезов Ю.В. Методологические основы прогнозирования динамики и последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций: дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 2005. 394 с.

Podrezov Yu.V. *Methodological Fundamentals for Predicting the Dynamics and Consequences of Forest Fire Emergencies*: Dr. Agric. Sci. Diss. Mytischki Branch of BMSTU Publ., 2005. 394 p. (In Russ.).

13. Подрезов Ю.В. Методический подход к оценке достаточности мероприятий по предупреждению чрезвычайных лесопожарных ситуаций на территории Российской Федерации // Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемирн. дню гражд. обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности»: в 4 ч. Ч. II / сост. В.С. Бутко, М.В. Алешков, С.В. Подкосов, А.Г. Заворотный и др. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2022. С. 24–27.

Podrezov Yu.V. Methodological Approach for Estimation the Sufficiency of Measures to Prevent Emergency Forest Fire Situations on the Territory of the Russian Federation. *Proceedings of the 6th International Scientific-Practical Conference dedicated to the World Civil Defense Day "Civil Defense on Guard of Peace and Security"*. Moscow, State Fire Service Academy of the EMERCOM of Russia Publ., 2022, pp. 24–27. (In Russ.).

14. Подрезов Ю.В., Шахрамьян М.А. Методологические основы прогнозирования последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций: моногр. 1-е изд. М.: ВНИИ ГОЧС, 2001. 246 с.

Podrezov Yu.V., Shakhramanyan M.A. *Methodological Basis for Predicting the Consequences of Forest Fire Emergencies*: Monograph. First edition. Moscow, VNI GOChS Publ., 2001. 246 p. (In Russ.).

15. Саркисян С.А., Минаев Э.С., Каспин В.И. и др. Теория прогнозирования и принятия решений / под ред. С.А. Саркисяна. М.: Высш. шк., 1977. 351 с.

Sarkisyan S.A., Kaspin V.I., Lisichkin V.A., Minayev E.S., Pasechnik G.S. *Theory of Prediction and Decision-Making*. Moscow, 1977. 351 p. (In Russ.).

16. Тихомиров Н.П., Попов В.А. Методы социально-экономического прогнозирования. М.: ВЗПИ, Росвузнаука, 1992. 228 с.

Tikhomirov N.P., Popov V.A. *Methods of Socio-Economic Forecasting*. Moscow, VZPI: Rosvuznauka Publ., 1992. 228 p. (In Russ.).

17. Червоный М.Г. Охрана лесов от пожаров. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 104 с.
Chervonnyy M.G. *Protecting Forests from Fires*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 104 p. (In Russ.).

18. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1974. 586 с.

Yanch E. *Forecasting Scientific and Technological Progress*. Moscow, Progress Publ., 1974. 586 p. (In Russ.).

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

20. Chuvieco E., Aguadoa I., Yebraa M., Nieto H., Salas J., Martín M.P. et al. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>

21. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Development and Testing of Models for Predicting Crown Fire Rate of Spread in Conifer Forest Stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 7, pp. 1626–1639. <https://doi.org/10.1139/x05-085>
22. Davis R., Yang Z., Yost A., Belongie C., Cohen W. The Normal Fire Environment – Modeling Environmental Suitability for Large Forest Wildfires Using Past, Present, and Future Climate Normals. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 390, pp. 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.027>
23. Martínez J., Vega-García C., Chuvieco E. Human-Caused Wildfire Risk Rating for Prevention Planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90, no. 2, pp. 1241–1252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005>
24. Mavsar R., Cabán A.G., Varela E. The State of Development of Fire Management Decision Support Systems in America and Europe. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 29, pp. 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.11.009>
25. Perminov V., Goudov A. Mathematical Modeling of Forest Fires Initiation, Spread and Impact on Environment. *International Journal of GEOMATE*, 2017, vol. 13, no. 35. <https://doi.org/10.21660/2017.35.6704>
26. Rothermel R.C. *Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 1991. 46 p. <https://doi.org/10.2737/INT-RP-438>
27. Safi Y., Bouroumi A. Prediction of Forest Fires Using Artificial Neural Networks. *Applied Mathematical Sciences*, 2013, vol. 7, pp. 271–286. <https://doi.org/10.12988/ams.2013.13025>
28. Sanchez H. *Forest Fires and Research Priorities in Mexico*. Vol. 2. Mexico, Mexican Forestry Congress, 1989, pp. 719–723.
29. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping Regional Forest Fire Probability Using Artificial Neural Network Model in a Mediterranean Forest Ecosystem. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 2016, vol. 7, no. 5, pp. 1645–1658. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084541>
30. Van Wagner C.E. Conditions for the Start and Spread of Crown Fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, vol. 7, no. 1, pp. 23–34. <https://doi.org/10.1139/x77-004>

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

Original article

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-183-194

Features of Triploid Aspen Clonal Micropropagation Using Modern Growth-Stimulating Preparations

Sergey S. Makarov^{1,4}, *Doctor of Agriculture, Senior Research Scientist;*

ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Evgeniy S. Bagaev², *Candidate of Agriculture, Leading Engineer;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-4748>

Anton I. Chudetsky², *Leading Engineer;* ResearcherID: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>

Irina B. Kuznetsova³, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

Olga P. Lebedeva⁴, *Training Master;* ResearcherID: [G-7967-2019](https://orcid.org/0000-0002-5282-4904),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

Alexandr M. Antonov⁴, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [R-4605-2019](https://orcid.org/0000-0002-7076-233X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7076-233X>

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127434, Russian Federation; makarov_serg44@mail.ru[✉]

²Central European Forest Experimental Station, prosp. Mira, 134, Kostroma, 156013, Russian Federation; ce-los-lh@mail.ru, a.chudetsky@mail.ru

³Kostroma State Agricultural Academy, ul. Uchebnyy gorodok, Karavaevskaya s/a, 34, p. Karavaevo, Kostroma District, Kostroma Region, 156530, Russian Federation; sonnereiser@yandex.ru

⁴Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; makarov_serg44@mail.ru[✉], o.lebedeva@narfu.ru, a.antonov@narfu.ru

Received on January 16, 2022 / Approved after reviewing on April 15, 2022 / Accepted on April 18, 2022

Abstract. The creation of fast-growing triploid aspen plantations in the area of wood processing enterprises has high importance in terms of increasing demand for deciduous wood associated with the development of board production and the prospects for the introduction of innovative technologies for deep processing of wood. The article presents the results of studies of triploid aspen clones of Kostroma origin at the stages of “introduction to *in vitro* culture”, “proper micropropagation”, and “rooting of microshoots” with the use of growth-regulating substances. At the “introduction culture to *in vitro*” stage, the most effective sterilizing agents were silver nitrate with the concentration of 0.2 %, Lysoformin 3000, 5 % applied for 15 min and sulema, 0.2 % used for 10 min. At the “proper micropropagation” stage, the total length of triploid aspen shoots did not differ significantly depending on the composition of the nutrient media studied but was slightly exceeded the options with Woody Plant Medium. An increase by 1.2–2.6 times was observed in the total length of triploid aspen microshoots *in vitro*, when the concentration of 6-benzylaminopurine in the nutrient medium was increased from 0.5 to 1.0 mg/L. The maximum value of the total length (5.6 cm) of triploid aspen microshoots *in vitro* was observed on Woody Plant Medium at the 6-benzylaminopurine concentration of 1.0 mg/L and the presence of Epin-Extra preparation of 0.5 mg/L. At the “rooting of microshoots” stage the number, average, and total length of triploid aspen roots *in vitro* had no statistically significant differences depending on the nutrient medium composition. Increasing the concentrations of indole-3-butyric acid and indole-3-acetic acid from 1.0 to

2.0 mg/L in the nutrient medium increased the total length of regenerated plant roots of triploid aspen *in vitro* by 2.3–2.4 times. The maximum total length (5.1 cm) of triploid aspen roots *in vitro* was observed on Woody Plant Medium with indole-3-butyric acid at a concentration of 1.0 mg/L. Clonal micropropagation appears to be a perspective for accelerated production of elite planting material of triploid aspen for the purposes of laying out timber plantations.

Keywords: triploid aspen, clone, forest plantations, clonal micropropagation, *in vitro*, organogenesis, rhizogenesis, growth-regulating substances

For citation: Makarov S.S., Bagaev E.S., Chudetsky A.I., Kuznetsova I.B., Lebedeva O.P., Antonov A.M. Features of Triploid Aspen Clonal Micropropagation Using Modern Growth-Stimulating Preparations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 183–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-183-194>

Научная статья

Особенности клонального микроразмножения триплоидной осины с применением ростостимулирующих препаратов

С.С. Макаров^{1,4✉}, д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Е.С. Багаев², канд. с.-х. наук, вед. инж.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-4748>

А.И. Чудецкий², вед. инж.; ResearcherID: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>

И.Б. Кузнецова³, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

О.П. Лебедева⁴, уч. мастер; ResearcherID: [G-7967-2019](https://orcid.org/0000-0002-5282-4904),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

А.М. Антонов⁴, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [R-4605-2019](https://orcid.org/0000-0002-7076-233X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7076-233X>

¹ Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127434; makarov_serg44@mail.ru✉

² Центрально-Европейская лесная опытная станция, просп. Мира, д. 134, г. Кострома, Россия, 156013; se-los-lh@mail.ru, a.chudetsky@mail.ru

³ Костромская государственная сельскохозяйственная академия, ул. Учебный городок, Караваяевская с/а, д. 34, п. Караваяево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; sonnereiser@yandex.ru

⁴ Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; makarov_serg44@mail.ru✉, o.lebedeva@narfu.ru, a.antonov@narfu.ru

Поступила в редакцию 16.01.22 / Одобрена после рецензирования 15.04.22 / Принята к печати 18.04.22

Аннотация. В условиях возрастающего спроса на древесину лиственных пород в связи с развитием плитного производства и перспективами внедрения инновационных технологий глубокой переработки древесины создание быстрорастущих плантаций триплоидной осины вблизи деревоперерабатывающих предприятий является актуальным. Приведены результаты исследований клонов триплоидной осины костромского происхождения на этапах введения в культуру *in vitro*, собственно микроразмножения и укоренения микропобегов с применением росторегулирующих веществ. На этапе вве-

дения в культуру *in vitro* наиболее эффективными стерилизующими агентами оказались нитрат серебра концентрацией 0,2 % и «Лизоформин 3000», 5 %, применявшиеся в течение 15 мин, а также сулема, 0,2 %, использовавшаяся в течение 10 мин. На этапе собственно микроразмножения суммарная длина побегов триплоидной осины не имела существенных различий в зависимости от состава исследуемых питательных сред, однако была незначительно больше в вариантах с питательной средой WPM. При повышении в питательной среде концентрации цитокинина 6-БАП от 0,5 до 1,0 мг/л наблюдалось увеличение суммарной длины микропобегов триплоидной осины *in vitro* в 1,2–2,6 раза. Максимальная суммарная длина микропобегов (5,6 см) триплоидной осины *in vitro* отмечена на питательной среде WPM при концентрации цитокинина 6-БАП 1,0 мг/л и наличии препарата «Эпин-Экстра» в концентрации 0,5 мг/л. На этапе укоренения микропобегов количество, средняя и суммарная длина корней триплоидной осины *in vitro* не имели статистически значимых различий в зависимости от состава питательной среды. Повышение в питательной среде концентраций ИМК и ИУК от 1,0 до 2,0 мг/л способствовало увеличению суммарной длины корней растений-регенерантов триплоидной осины *in vitro* в 2,3–2,4 раза. Максимальная суммарная длина корней (5,1 см) триплоидной осины *in vitro* отмечена на питательной среде WPM с ауксином ИМК в концентрации 1,0 мг/л. Использование клонального микроразмножения перспективно для ускоренного получения элитного посадочного материала триплоидной осины в целях закладки лесосырьевых плантаций.

Ключевые слова: триплоидная осина, клон, лесные плантации, клональное микроразмножение, *in vitro*, органогенез, ризогенез, росторегулирующие вещества

Для цитирования: Makarov S.S., Bagaev E.S., Chudetsky A.I., Kuznetsova I.B., Lebedeva O.P., Antonov A.M. Features of Triploid Aspen Clonal Micropropagation Using Modern Growth-Stimulating Preparations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 183–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-183-194>

Introduction

In recent decades, global forestry has seen a steady trend of transition from traditional forest practice towards plantation cultivation of wood with a short rotation cycle and the use of modern biotechnology [9]. About 1 million hectares of plantation crops are created annually in the world for producing pulpwood, sawlogs, and fuel wood. Forest plantations provide up to 17 % of the world wood's consumption [19]. The creation of target forest plantations and the transition to the arrangement of sustainable forest management will allow wood deep processing enterprises to solve the problem of bringing raw materials closer to production, reduce the cost of creating forest infrastructure, and ensure their further development. Large-scale development of forest plantations for cultivation of fast-growing wood species with target wood is necessary for the practical combination of forestry intensification and forest management. It will eliminate the lack of small-sized wood raw materials for the development of pulp, board and biofuel industries [12]. Plantation forest growing enables to accelerate by 1.5–3 times the production of target wood compared to the traditional method [4]. The practice of the developed countries (Germany, Finland, Canada, Italy, etc.) shows the wide possibilities for rapid industrial cultivation of fast-growing plantation stands for processing industry and fuel-energy purposes.

In Russia, aspen (*Populus tremula* L.), one of the fastest-growing and fastest-ripening wood species, is among the promising species for plantation cultivation that

are a source of raw materials and biofuels. Its wood is used in the pulp and paper industry, the construction, the production of wood panels and many other areas [13]. Modern technologies of deep wood processing open new directions for usage of aspen wood: wood biofuel production, environmentally friendly pressed and composite materials, nanocellulose, raw materials for the pharmaceutical, the food, and the fragrance industries, etc. However, the widespread use of aspen is hindered by the massive damage to trees by stem rot caused by the false aspen tinder fungus (*Phellinus tremulae* (Bond.) Bond. et. Boriss.). According to Academician A.S. Yablokov, 70–90 % of aspen stands are infected with stem rot [24]. The average infestation of aspen allotments in the Kostroma region at the age of 41–50 years is 30 % with an 80 % occurrence of affected allotments; and 54 % with an 85 %, respectively, at the age of 51–60 years [22].

The Kostroma region is unique in the productivity of triploid forms of aspen (*Populus tremula gigas*), first selected in Russia in the Sharya forest district by Academician A.S. Yablokov, who proved their ploidy. Later, works on aspen breeding for productivity and resistance to rot diseases with the selection and reproduction of promising forms for target cultivation in several regions of Central Russia were carried out for 40 years [7, 23, 24]. Triploid aspen is called Giant aspen for its fast growth and high productivity. Triploid clone No. 27 in the genetic reserve in the Sharya district of the Kostroma region had a stock of 340 m³/ha by the age of 25 years, which was 2 times higher than the stock of ordinary aspen [6]. At the same age, test crops planted from root shoots of clone No. 27 in the Ivanteevka Forest Tree Nursery (Moscow region) had a stock of more than 300 m³/ha and were suitable for pulpwood harvesting, whereas the common diploid aspen (clone No. 29) gave a stock of 100 m³/ha in similar conditions [25]. At the age of 52 years, the stock of aspen giant clone No. 27 reached 500 m³/ha, exceeding the stock of diploid clone No. 29 by more than 30 % [2]. At the same time, triploid aspen retains resistance to stem rot.

The importance of preservation and reproduction of a valuable aspen gene pool is caused by the unique silvicultural qualities of both triploid and fast-growing diploid aspen clones selected in the Sharya forest district in terms of fast growth, resistance to rots, and high quality wood. Plantation cultivation of elite aspen clones can be realized on the base of the genetic reserve. This acquires great importance due to the increasing demand for hardwood in connection with the development of board production and the prospects of introducing innovative technologies for deep mechanical, chemical and energy processing of wood. The creation of fast-growing aspen plantations is especially relevant in the area of modern forest sector enterprises, which use timber from soft-wooded broadleaved species.

Currently, plantations of triploid aspen are laid out in the following regions of Russia: the Leningrad region, the Voronezh region, the Moscow region, the Republic of Mari El, and the Republic of Tatarstan. The Saint Petersburg Forestry Research Institute (SPBNILH) is the most experienced in plantation cultivation of highly productive aspen. In several forestries in the Leningrad region, aspen plantations were planted using experimental planting material grown by the clonal micropropagation method [20, 26]. Felling age of aspen plantations is 30 years; productivity is up to 400 m³/ha [5]. The Research Institute of Forest Genetics, Breeding, and Biotechnology (VNIILGISbioTech) carried out experiments on

plantation cultivation of hardwood for 30 years that resulted in aspen yield with an average trunk volume of 1.1–1.8 m³. The average wood stock was 720 m³/ha; the basic wood density was 395 kg/m³ [19]. There is an opinion that wood stock of about 100 m³/ha is achieved in triploid aspen plantations within 15 years [12]. The same authors suggest that in North-West Russia triploid aspen plantations at the felling age of 20–30 years in optimal forest site conditions will produce a target wood stock of 150–300 m³/ha. The experience of Sweden and Finland has shown that using the plantation method of triploid aspen cultivation it is possible to produce healthy wood for pulpwood production as early as 12–14 years after planting [13].

It is necessary to provide accelerated production of elite planting material on the industrial basis in order to lay out timber plantations of triploid aspen as a producer of raw material and biofuel. For the purposes of plantation cultivation, it is advisable to use modern methods of biotechnology, such as clonal micropropagation, which allows to produce a large amount of high-quality, healthy planting material, including species poorly propagated by the traditional methods, in a short time throughout a year [21]. So far, studies on the introduction of triploid forms of aspen to *in vitro* culture have been carried out by a number of Russian scientists from different regions of the country [1, 8, 10, 14, 17, 28]. Since 2010, studies have been carried out at the Central European Forest Experimental Station of the All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (ARRISFM) [3, 16, 27]. There is a need to improve the technology of triploid aspen clonal micropropagation with the use of modern sterilizing agents and growth-stimulating preparations.

The research is aimed at studying the features of clonal micropropagation of triploid aspen clones of Kostroma origin at the stages of “introduction culture to *in vitro*”, “proper micropropagation”, and “rooting of microshoots” with the use of modern sterilizing and growth-regulating substances.

Research objects and methods

The research was carried out at the Laboratory of Clonal Micropropagation of the Central European Forest Experimental Station of ARRISFM in 2019–2022 according to the generally accepted methods [11, 21]. We used explants obtained from the apical meristems of plants of triploid aspen clone No. 27 selected from the genetic reserve in the Sharya district of the Kostroma region as the study objects.

The following solutions were used as basic sterilizing agents at the stage of “introduction culture to *in vitro*”: sulema, 0.1 %; detergent “Domestos”, 1:3; hydrogen peroxide, 30 %, chlorinated lime, 1:1; silver nitrate, 0.2 %; preparations of eco-sterilizer chlorine free, 5 %, and Lysoformin 3000, 5 %. Sterilization time: 5, 10, 15, and 20 min. The viability of explants was recorded as the ratio of the number of survivors to the total number of those introduced to the culture. The plants were cultivated in the hormone-free (control) nutrient medium according to Murashige and Soog (MS) [18] and Woody Plant Medium (WPM) [15], including the options with a 2-fold dilution of the mineral base, in a light room at 23–25 °C, 75–80 % humidity and a 16/8 h photoperiod.

At the stage of “proper micropropagation” 6-benzylaminopurine (6-BAP) at concentrations of 0.5 and 1.0 mg/L and Epin-Extra preparation at a concentration

of 0.5 mg/L were used as cytokinin growth regulator in the nutrient medium. At the stage of “rooting of microshoots” Indole-3-butyric acid (IBA) and Indole-3-acetic acid (IAA) were used as auxins at concentrations of 0.5 and 1.0 mg/L. The number, average and total length of microshoots (on the 30th day) and roots (on the 45th day) per a regenerated plant were recorded. Experiments were carried out in 10-fold biological and 2-fold analytical replications. Fifteen test-tube plants were recorded in each option.

Experimental data were statistically processed using AGROS v.2.11 software and Microsoft Office Excel 2016. A two-way analysis of variance was applied, where factor A – nutrient medium; factor B – concentrations of growth-regulating substance. Reliability of differences between the average data from the experimental options was estimated using the least significant difference for the 5 % level of significance (LSD_{05}).

Research results and discussion

The studies revealed that at the stage of “introduction culture to *in vitro*” of triploid aspen explants the most effective basic sterilizers were silver nitrate (0.2 %) and Lysoformin 3000 (5 %) with sterilization time of 15 min, as well as in case of using sulema for 10 min. In these options, the viability of explants reached 80–82 %. With the increase in sterilization time for sulema treatment to 15 and 20 min, explant viability decreased sharply to 42 and 18 %, respectively, which appears to be related to the mercuric chloride phytotoxicity. At the sterilization time of 5 min, the percentage of viable explants, when treated with the studied sterilizing agents, was low and did not exceed 2–20 %; the remaining explants died of infection (table 1).

Table 1

The viability of triploid aspen (clone No. 27) explants depending on sterilizing agents and sterilization time, %

Sterilizing agent	Sterilization time, min			
	5	10	15	20
Hydrogen peroxide, 30 %	18	28	76	24
Sulema, 0.2 %	2	80	42	18
Chlorinated lime, 1:1	10	46	50	20
Silver nitrate, 0.2 %	14	42	80	42
Eco-sterilizer chlorine free, 5 %	20	24	42	50
Lysoformin 3000, 5 %	12	40	82	32

At the stage of “proper micropropagation”, there were no significant differences in the number of shoots among triploid aspen regenerated plants depending on the nutrient medium composition; 1.8–2.3 pcs on average. The number of shoots of regenerated plants increased on average by 1.3–1.9 times with the 6-BAP concentration increase from 0.5 to 1.0 mg/L. The highest number of triploid aspen microshoots was observed at the 6-BAP concentration of 1.0 mg/L, and when Epin-Extra preparation was added at the concentration of 0.5 ml/L. It was 3.0 pcs on average, while on WPM it reached the maximum of 3.8 pcs (table 2).

Table 2

The number of triploid aspen (clone No. 27) microshoots *in vitro* depending on the nutrient medium composition and the concentration of growth-regulating substances, pcs

Nutrient medium	Concentration of 6-BAP, mg/L				Average
	Without preparation		With addition of Epin-Extra, 0.5 ml/L		
	0.5	1.0	0.5	1.0	
Control	0.6	1.2	0.9	1.8	1.1
MS	1.1	1.9	1.4	2.9	1.8
MS 1/2	1.5	1.9	1.5	3.0	2.0
WPM	1.6	2.0	1.9	3.8	2.3
WPM 1/2	1.4	1.5	1.8	3.4	2.0
Average	1.2	1.7	1.5	3.0	–

Note: LSD₀₅ factor A = 1.32, factor B = 1.21, general = 1.80.

The average length of triploid aspen shoots had no statistically significant differences depending on the nutrient medium composition and ranged from 1.8 to 2.3 cm. The average length of triploid aspen shoots slightly increased by 1.3 times, with the 6-BAP concentration increase from 0.5 to 1.0 mg/L, and addition of Epin-Extra preparation, while in options without the preparation it was 1.7 cm at similar concentrations (table 3).

Table 3

The average length of triploid aspen (clone No. 27) microshoots *in vitro* depending on the nutrient medium composition and the concentration of growth-regulating substances, cm

Nutrient medium	Concentration of 6-BAP, mg/L				Average
	Without preparation		With addition of Epin-Extra, 0.5 ml/L		
	0.5	1.0	0.5	1.0	
Control	1.0	1.2	1.5	1.9	1.4
MS	1.5	1.4	1.8	2.5	1.8
MS 1/2	1.7	1.6	1.9	2.6	1.9
WPM	2.0	1.8	2.2	3.0	2.3
WPM 1/2	1.7	1.9	2.4	2.8	2.2
Average	1.6	1.6	2.0	2.6	–

Note: LSD₀₅ factor A = 1.87, factor B = 1.59, general = 1.92.

The total length of triploid aspen shoots was the longest (on average 5.6 cm) in the options with WPM, and only 3.5–4.8 cm in other options; although the differences were not statistically significant. The 6-BAP concentration increase in the nutrient medium from 0.5 to 1.0 mg/L and the addition of Epin-Extra preparation to the nutrient medium resulted in a considerable increase in the total length of triploid aspen shoots on average by 2.3 times, and in options without the preparation – by 1.8 times. The total length of triploid aspen shoots reached the maximum value (11.4 cm) on WPM at the 6-BAP concentration of 1.0 mg/L and presence of Epin-Extra preparation of 0.5 mg/L (table 4).

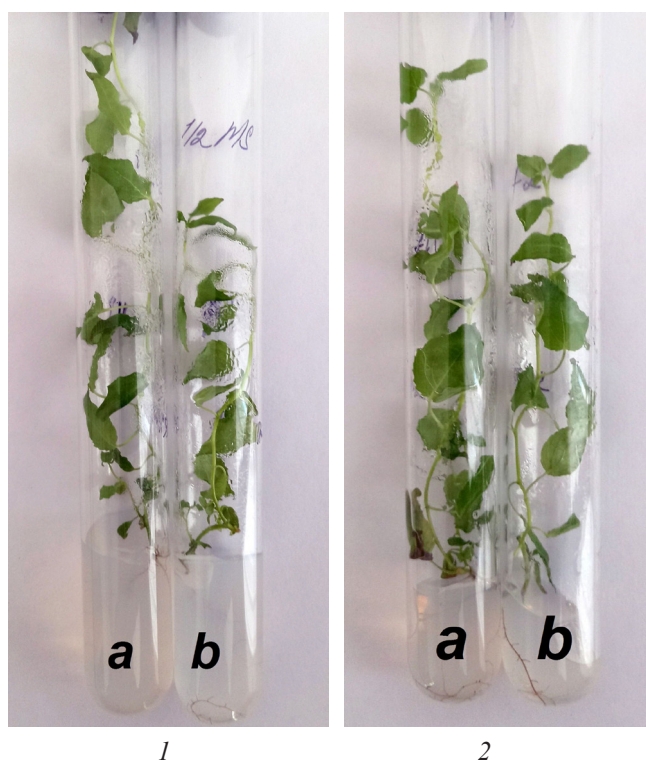
Table 4

The total length of triploid aspen (clone No. 27) microshoots *in vitro* depending on the nutrient medium composition and the concentration of growth-regulating substances, cm

Nutrient medium	Concentration of 6-BAP, mg/L				Average
	Without preparation		With addition of Epin-Extra, 0.5 ml/L		
	0.5	1.0	0.5	1.0	
Control	0.7	1.5	1.4	3.4	4.5
MS	1.6	2.7	2.5	7.3	3.5
MS 1/2	2.6	3.0	2.8	7.8	4.1
WPM	3.2	3.6	4.2	11.4	5.6
WPM 1/2	2.4	2.9	4.3	9.5	4.8
Average	1.9	2.7	3.0	7.9	–

Note: LSD₀₅ factor A = 1.67, factor B = 2.01, general = 1.96.

At the stage of “rooting of microshoots *in vitro*” (fig.) no significant differences were revealed in the number of roots of triploid aspen regenerated plants depending on the nutrient medium composition; it was 1.8–2.5 pcs.



Triploid aspen regenerated plants *in vitro* on MS (1) and WPM (2): a – complete medium; b – 2-fold mineral dilution medium

Number of roots per triploid aspen plant increased on average by 1.5 times with the IBA concentration increase from 1.0 to 2.0 mg/L in the nutrient medium, and by 1.8 times in the options with IAA (table 5).

Table 5

The number of triploid aspen (clone No. 27) roots *in vitro* depending on the nutrient medium composition and the concentration of auxins, pcs

Nutrient medium	Concentration of auxin, mg/L				Average
	IBA		IAA		
	0.5	1.0	0.5	1.0	
Control	1.0	2.1	1.1	1.6	1.5
MS	1.9	3.3	1.5	2.2	2.2
MS 1/2	2.3	3.2	1.3	2.5	2.3
WPM	2.7	3.4	1.3	2.4	2.5
WPM 1/2	1.3	3.0	1.0	2.0	1.8
Average	1.8	3.0	1.2	2.1	–

Note: LSD₀₅ factor A = 1.70, factor B = 1.54, general = 1.63.

The average length of triploid aspen roots had no statistically significant differences depending on the nutrient medium composition and was 1.0–1.3 cm. Concentrations of IBA and IAA also had no effect on the average length of triploid aspen roots (table 6).

Table 6

The average length of triploid aspen (clone No. 27) roots *in vitro* depending on the nutrient medium composition and the concentration of auxins, cm

Nutrient medium	Concentration of auxin, mg/L				Average
	IBA		IAA		
	0.5	1.0	0.5	1.0	
Control	0.5	0.9	0.6	0.8	0.7
MS	0.9	1.2	1.0	1.0	1.0
MS 1/2	0.8	1.3	1.2	1.3	1.2
WPM	1.0	1.5	1.0	1.5	1.3
WPM 1/2	1.0	1.5	1.0	1.5	1.3
Average	0.8	1.3	1.0	1.2	–

Note: LSD₀₅ factor A = 0.68, factor B = 0.76, general = 0.90.

The total length of triploid aspen roots had no statistically significant differences depending on the nutrient medium composition and ranged on average from 2.4 to 3.2 cm. The total length of triploid aspen roots *in vitro* increased by 2.4 times with the increase in IBA concentration from 0.5 to 1.0 mg/L, and by 2.3 times in case of IAA. Herewith, the maximum total length of triploid aspen roots (5.1 cm) was observed in the option with WPM and the IBA concentration of 1.0 mg/L (table 7).

Table 7

The total length of triploid aspen (clone No. 27) roots *in vitro* depending on the composition nutrient medium and the concentration of auxins, cm

Nutrient medium	Concentration of auxin, mg/L				Average
	IBA		IAA		
	0.5	1.0	0.5	1.0	
Control	0.5	1.9	0.7	1.3	1.1
MS	1.7	4.0	1.5	2.2	2.4
MS 1/2	1.8	4.2	1.3	3.3	2.7
WPM	2.7	5.1	1.3	3.6	3.2
WPM 1/2	1.3	4.5	1.0	3.0	2.5
Average	1.6	3.9	1.2	2.7	–

Note: LSD₀₅ factor A = 1.53, factor B = 1.42, general = 1.60.

The results of previous experiments on replanting of adapted plants of triploid aspen with closed root system obtained by the *in vitro* method (without addition of growth-stimulating preparations) to the open ground [4] suggest the prospects of using the clonal micropropagation method with the addition of modern growth-stimulating preparations for accelerated production of planting material of triploid aspen forms for further plantation laying out.

Conclusions

1. Silver nitrate, 0.2 %, and Lysoformin 3000, 5 %, with sterilization time of 15 min, as well as sulema, 0.2 % with, sterilization time of 10 min, proved to be the most effective sterilizing agents at the stage of “introduction to *in vitro* culture” during clonal micropropagation of triploid aspen.

2. The total length of triploid aspen shoots showed no significant differences depending on the composition of the nutrient media studied, while being slightly longer in the options with WPM.

3. Increasing the 6-BAP concentration in the nutrient medium from 0.5 to 1.0 mg/L promoted a significant increase in the total length of triploid aspen microshoots *in vitro* when Epin-Extra preparation at the concentration of 0.5 mg/L was added to the nutrient medium.

4. The total length of triploid aspen microshoots *in vitro* reached its maximum value on WPM at the 6-BAP concentration of 1.0 mg/l and in the presence of Epin-Extra preparation of 0.5 mg/L.

5. The number, average, and total length of triploid aspen roots *in vitro* had no statistically significant differences depending on the composition of the nutrient medium studied.

6. The total length of regenerated plants' roots increased significantly during clonal micropropagation of triploid aspen *in vitro*, with the IBA and IAA concentrations increasing from 1.0 to 2.0 mg/L in the nutrient medium.

7. The maximum total length of triploid aspen roots *in vitro* was observed in the option with WPM and the IBA concentration of 1.0 mg/L.

REFERENCES

1. Anokhina N.S., Konovalov V.F., Khanova E.R. Microclonal Propagation of Karelian Birch and Triploid Aspen *in vitro*. *Ecobiotech*, 2021, vol. 4, no. 2, pp. 101–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-2-101-106>
2. Bagaev E.S. Genetic Reserve of Giant Aspen in the Kostroma Region. *Forestry Information*, 2008, no. 10-11, pp. 36–38. (In Russ.).
3. Bagaev E.S., Korenev I.A., Bagaev S.S., Zontikov D.N. Features of the Formation of Fast-Growing Clones in the Genetic Reserve of Giant Aspen. *Lesnoye khozyaystvo*, 2013, no. 2, pp. 26–28. (In Russ.).
4. Bagaev E.S., Makarov S.S., Bagaev S.S., Rodin S.A. *Giant Aspen: Biological Features and Prospects of Plantation Cultivation*: Monograph. Pushkino, VNIILM Publ., 2021. 72 p. (In Russ.).
5. Bagaev E.S., Ryzhova N.V., Shutov V.V. *Management in Aspen Forests of the Kostroma Region*: Monograph. Kostroma, KGTU Publ., 2014. 138 p. (In Russ.).
6. Bagaev S.N. *Selection of Valuable Aspen and Birch Forms in the Kostroma Region*. Moscow, Prospekt VDNKh USSR Publ., 1964. 4 p. (In Russ.).
7. Bagaev S.N., Bagaev E.S. Genetic Reserve of Giant Aspen. *Lesnoye khozyaystvo*, 1990, no. 4, pp. 45–48. (In Russ.).
8. Bovicheva N.A., Shabunin D.A., Zhigunov A.V., Podolskaya V.A. Cultivation of Aspen Triploid Seedlings from Regenerants Obtained by *in vitro* Technology. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2006, no. 3(16), pp. 68–76. (In Russ.).
9. Campbell M.M., Brunner A.M., Jones H.M., Strauss S.H. Forestry's Fertile Crescent: The Application of Biotechnology to Forest Trees. *Plant Biotechnology Journal*, 2003, vol. 1, iss. 3, pp. 141–154. <https://doi.org/10.1046/j.1467-7652.2003.00020.x>
10. Garipov N.R. *Selection and Cultivation of Triploid Aspen (Populus tremula L.) Using Methods of Molecular Genetics and Biotechnology in the Republic of Tatarstan*: Cand. Agric. Sci. Diss. Moscow, 2014. 128 p. (In Russ.).
11. Kalashnikova E.A. *Cellular Engineering of Plants*. Moscow, RSAU-MTAA Publ., 2012. 217 p. (In Russ.).
12. Krylov V., Kovaleva O., Smirnov A. Industrial Forest Plantations as a New Forest Business. *LesPromInform*, 2015, no. 3, pp. 44–46. (In Russ.).
13. Kuznetsov A. Aspen as a Valuable Wood Raw Material. *LesPromInform*, 2009, no. 8, pp. 94–98. (In Russ.).
14. Lebedev V.G., Shestibratov K.A. Creation of Biotechnological Forms of Woody Plants. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2015, no. 3, pp. 222–232. (In Russ.).
15. Lloyd G., McCown B. Commercially-Feasible Micropropagation of Mountain Laurel, *Kalmia latifolia*, by Use of Shoot-Tip Culture. *Combined Proceedings, International Plant Propagators' Society*, 1980, vol. 30, pp. 421–427.
16. Makarov S.S., Pankratova A.A. Study of the Effect of Growth Regulating Substances of Different Nature in the Clonal Micropropagation of Aspen. *Forestry Information*, 2016, no. 3, pp. 138–143. (In Russ.).
17. Mashkina O.S., Shabanova E.A., Varivodina I.N., Grodetskaya T.A. Field Trials of *in vitro* Propagated Aspen Clones (*Populus tremula* L.): Growth, Productivity, Wood Quality, and Genetic Stability. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 6, pp. 25–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.25>
18. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*, 1962, vol. 15, iss. 3, pp. 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
19. Panichev G.P. Plantation Cultivation of Forest Resources. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2014, no. 3, pp. 43–46. (In Russ.).

20. Shabunin D.A., Podol'skaya V.A., Bovicheva N.A. Obtaining Planting Material of Fast-Growing Forms of Aspen Using *in vitro* Method and Laying out Plantations. *Forestry Information*, 2008, no. 3-4, pp. 51–53. (In Russ.).
21. Shevelukha V.S., Voronin E.S., Kalashnikova E.A., Kovalev V.M., Kovalev A.A., Kochiyeva E.Z. et al. *Agricultural Biotechnology and Bioengineering*. Ed. by V.S. Shevelukha. Moscow, URSS Publ., 2015. 704 p. (In Russ.).
22. Storozhenko V.G. The Infestation of Aspen Forests of the Kostroma Region with Aspen Moth. *Lesnoye khozyaystvo*, 1979, no. 10, pp. 54–55. (In Russ.).
23. Yablokov A.S. Giant Form of Aspen in the USSR Forests. *Trudy VNIILKh*, 1941, iss. 23, pp. 1–52. (In Russ.).
24. Yablokov A.S. *Cultivation and Breeding of Healthy Aspen*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 441 p. (In Russ.).
25. Yablokov A.S. On the Cultivation and Breeding of Aspen Trees. *Lesnoye khozyaystvo*, 1967, no. 4, pp. 14–20. (In Russ.).
26. Zhigunov A.V., Shabunin D.A., Butenko O.Yu. Triploid Aspen Forest Plantations of *in vitro* Planting Material. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest Ecology. Nature Management*, 2014, no. 4(24), pp. 21–30. (In Russ.).
27. Zontikov D.N., Korenev I.A. The Factors Influencing on Morphogenesis Aspens (3 n) in Culture *in vitro*. *Innovations and Technologies in Forestry: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, SPbNIILKh Publ., 2012, part 2, pp. 99–104. (In Russ.).
28. Zontikov D.N., Zontikova S., Sergeev R., Shurgin A., Sirotina M. Micropropagation of Highly Productive Forms of Diploid and Triploid Aspen. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 962-965, pp. 681–690. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.962-965.681>

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

Краткое сообщение

УДК 631.544.43;004.896

DOI:10.37482/0536-1036-2023-2-195-201

Анализ воздействия ветровой нагрузки на каркас теплицы для выращивания семян с закрытой корневой системой

Д.В. Черник[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearchID: [ACY-8919-2022](https://orcid.org/0000-0002-8114-764X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8114-764X>

Е.В. Авдеева, д-р с.-х. наук, доц.; ResearchID: [GLR-2803-2022](https://orcid.org/0000-0003-3425-7157),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3425-7157>

К.Н. Черник, мл. науч. сотр.; ResearchID: [ETZ-9702-2022](https://orcid.org/0000-0003-1203-4825),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>

Н.Л. Ровных, мл. науч. сотр.; ResearchID: [GLR-2881-2022](https://orcid.org/0000-0001-6514-3393),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6514-3393>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; dionisu2@mail.ru[✉], e.v.avdeeva@gmail.com, Kristi.blueberry@yandex.ru, chacha.92@bk.ru

Поступила в редакцию 24.01.22 / Одобрена после рецензирования 20.04.22 / Принята к печати 22.04.22

Аннотация. Воспроизводство лесов является одним из приоритетных направлений государственной политики Российской Федерации. Искусственное возобновление лесов, в том числе с использованием технологии выращивания семян с закрытой корневой системой, показало высокую эффективность в условиях, где естественное лесовосстановление не находило должного развития. Особенно это касается площадей, подвергнутых концентрированным сплошным вырубкам и пострадавших от верховых пожаров. Несмотря на высокую стоимость, технология выращивания семян с закрытой корневой системой является экономически целесообразной за счет высокой приживаемости растений и возможности производить посадку в течение длительного периода времени. Для реализации данной технологии применяются теплицы промышленного формата, при проектировании которых необходимо учитывать внешние нагрузки, в том числе ветровые, зависящие от территориального расположения конструкции. Цель работы – обосновать параметры конструкции каркаса теплицы достаточной прочности для выращивания семян с закрытой корневой системой. Объектом исследования является твердотельная модель каркаса теплицы. Исследование осуществлено для условий климата Красноярского края. Выполнен анализ нагрузок и напряжений, возникающих в элементах конструкции теплицы под действием их собственного веса и ветровых воздействий, с использованием метода твердотельного моделирования. При помощи основанного на методе конечных элементов алгоритма исследования напряжений в системе автоматизированного проектирования рассчитаны основная и пиковая ветровые нагрузки, воздействующие на каркас теплицы, определены размеры его участков и ветровые нагрузки на этих участках, максимальные напряжения, возникающие на каркасе теплицы под действием основной и пиковой ветровых нагрузок, наиболее нагруженные места конструкции. Даны рекомендации по оптимизации конструкции.

Ключевые слова: лесовосстановление, теплица, закрытая корневая система, семена с закрытой корневой системой, твердотельное моделирование, анализ нагрузок, система автоматизированного проектирования, Красноярский край

Благодарности: Проект «Разработка импортозамещающего комплекса оборудования точного высева семян для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой, оптимизация параметров модульной теплицы для условий лесничеств Красноярского края» (№ 2022030508374) поддержан Красноярским краевым фондом науки.

Для цитирования: Черник Д.В., Авдеева Е.В., Черник К.Н., Ровных Н.Л. Анализ воздействия ветровой нагрузки на каркас теплицы для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 195–201. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-195-201>

Brief presentation

Analysis of Wind Load Effect on Greenhouse Frame for Cultivation Seedlings with Closed Root System

Denis V. Chernik[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ACY-8919-2022](https://orcid.org/0000-0002-8114-764X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8114-764X>

Elena V. Avdeeva, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [GLR-2803-2022](https://orcid.org/0000-0003-3425-7157), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3425-7157>

Kristina N. Chernik, Junior Research Scientist; ResearcherID: [ETZ-9702-2022](https://orcid.org/0000-0003-1203-4825), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>

Nikita L. Rovnykh, Junior Research Scientist; ResearcherID: [GLR-2881-2022](https://orcid.org/0000-0001-6514-3393), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6514-3393>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. named after gazeta Krasnoyarskiy Rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; dionisu2@mail.ru[✉], e.v.avdeeva@gmail.com, Kristi.blueberry@yandex.ru, chacha.92@bk.ru

Received on January 24, 2022 / Approved after reviewing on April 20, 2022 / Accepted on April 22, 2022

Abstract. Reforestation is one of the priorities of the state policy of the Russian Federation. Artificial recreation of forests, including a closed root system seedling cultivation technology, has shown its high efficiency in the conditions where natural recovery didn't develop at the proper extent, especially in the areas affected by large-scale clearcuts and crown fires. Despite the high cost of the closed root system seedling cultivation technology, it is economically viable due to the high survival rate of the plants and the possibility to carry out the planting process over a long period of time. The industrial greenhouses are used for this technology and their construction engineering must consider the influence of external stress, including wind load that depends on the territorial location of the structure. The purpose of the study is to justify the construction characteristics of a greenhouse frame with a sufficient strength for the cultivation of seedlings with the closed root system. The object of the study is a rigid frame model of the greenhouse. The study was performed in the climate conditions of the Krasnoyarsk Krai. The stress and strain analysis are made on the greenhouse construction elements under the conditions of their own weight and wind load using the method for solid modelling. The principal and the peak loads, the dimensions of the most stained areas, the influence of the wind load in these regions are calculated by applying the finite element algorithm for stress analysis simulated in a CAD software. The recommendations for the optimization of the structure are given.

Keywords: reforestation, greenhouse, closed roof system, seedlings with closed root system, solid modeling, stress and strain analysis, CAD software, Krasnoyarsk Krai



Funding: Project “Development of an Import-Substituting Equipment Complex for Precision Planting in Cultivation of Seedlings with Closed Root System, Optimization of Modular Greenhouse Parameters in the Conditions of Forestry Facilities in Krasnoyarsk Krai”, No. 2022030508374 supported by the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

For citation: Chernik D.V., Avdeeva E.V., Chernik K.N., Rovnykh N.L. Analysis of Wind Load Effect on Greenhouse Frame for Cultivation Seedlings with Closed Root System. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 195–201. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-195-201>

Введение

Исходя из стратегического планирования на период до 2030 г., государственная политика Российской Федерации в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов направлена на дальнейшее развитие лесовосстановления [6, 12].

Искусственное восстановление лесов осуществляется путем посадки саженцев или посева семян лесных растений. Используются сеянцы и саженцы с открытой и закрытой корневой системой (ЗКС). Большинство исследователей едины во мнении о том, что искусственные насаждения превосходят естественные по производительности и увеличение доли искусственного лесовосстановления и лесоразведения можно рассматривать как способ повышения продуктивности лесов [3–5, 7, 15, 16, 18]. Особенно подчеркивается эффективность искусственного лесовосстановления для территорий, пройденных огнем [19].

Перспективным считается лесной посадочный материал с ЗКС, который выращивают в контейнерах, брикетах разных формы и размеров, торфоперегнойных горшочках и т. п. с полным комплексом органоминеральных удобрений и микроэлементов [1]. В процессе выращивания посадочного материала в теплицах проводят подкормку сеянцев и саженцев. Все это обеспечивает хороший рост растений в питомнике [11]. Несмотря на то, что себестоимость сеянца с ЗКС на 42 % превышает себестоимость сеянца с открытой корневой системой, использование первого вида посадочного материала экономически обосновано, так как обеспечивает относительно высокую приживаемость растений и позволяет производить посадку в течение длительного периода времени [9].

Исходя из сказанного, разработка и совершенствование технологии и оборудования для выращивания посадочного материала с ЗКС являются актуальными.

Цель работы – совершенствование конструкции модульной теплицы для выращивания сеянцев с ЗКС на основе анализа ветровых нагрузок.

Объекты и методы исследования

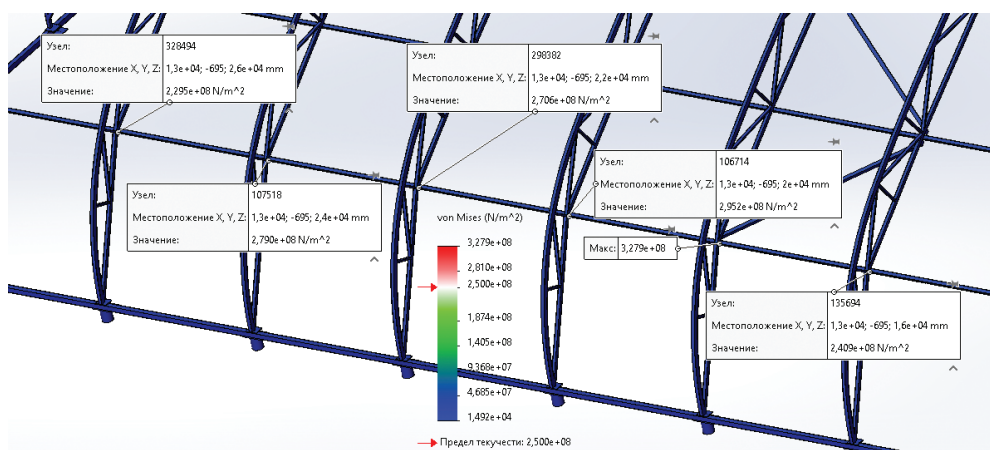
Проведен анализ нагрузок и напряжений, возникающих в элементах конструкции теплицы под действием внутренних и внешних сил. Используются инструменты твердотельного моделирования с предварительным расчетом ветровой нагрузки на конструкцию теплицы. Учтены воздействия ветра от основной и пиковой типов ветровой нагрузки. Данные воздействия определены согласно СП 20.13330.2016 и СП 107.13330.2012. При этом учтены габаритные размеры теплицы и ее территориальное расположение. Исследование проведено для природно-климатических условий Красноярского края.

Для анализа нагрузок и напряжений, возникающих в элементах конструкции теплицы под действием внутренних и внешних сил, применяли систему автоматизированного проектирования, алгоритм расчета нагрузок которой основан на методе конечных элементов и использует распределение фон Мизеса (von Mises) [2, 8, 10, 13, 14, 17, 20]. Расчеты выполнены в программе Solidworks Simulation.

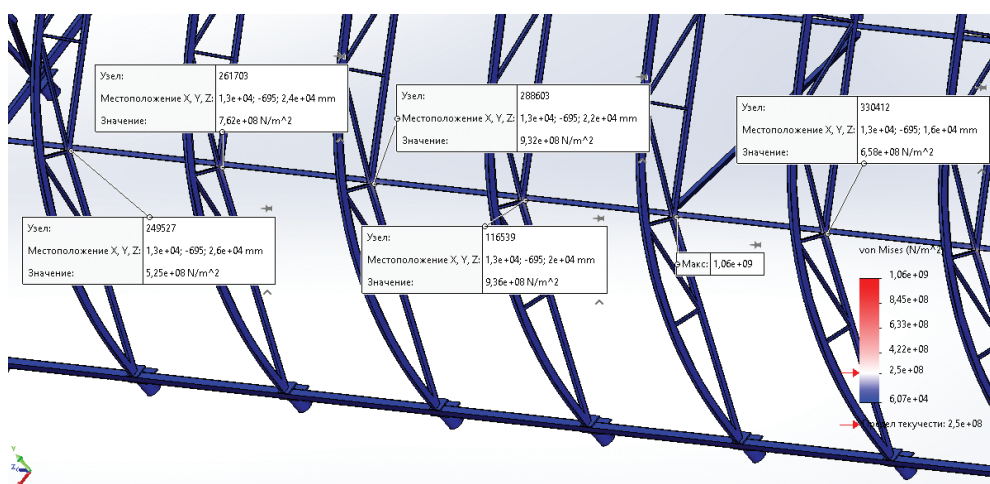
Результаты исследования и их обсуждение

Анализ напряжений, вызываемых основной и пиковой ветровыми нагрузками, показал, что наибольшие напряжения, превышающие допустимые в 4,22 раза, возникают в элементах конструкции теплицы в случае $\alpha = 90^\circ$, т. е. когда вектор скорости ветра направлен перпендикулярно плоскости торцевой конструкции. При этом пятно максимальной концентрации напряжений находится на сгибе внутреннего пояса с боковой стороны 8-й арки.

Выявлено, что одними из наиболее нагруженных мест рядовых конструкций являются узлы, приближенные к месту крепления арок к сваям (см. рисунок). Максимальные напряжения возникают ближе к центральной части теплицы. Исходя из этого проведено исследование нагрузок 3–8-й арок от торцевой конструкции, подвергшейся воздействию основной и пиковой ветровых нагрузок. Результаты представлены на рисунке.



а



б

Зондирование наиболее нагруженных мест арок рядовых конструкций при ветровой нагрузке: а – основной; б – пиковой. Программа Solidworks Simulation
 Probing of the most stressed areas of the constructional arches influenced by wind load in Solidworks Simulation software: а – principal load; б – peak load

При воздействии пиковой ветровой нагрузки на подветренной стороне торцевой арки в узлах сочленения диагональных и поперечных связей также возникают напряжения, превышающие допустимые.

Выводы

По результатам анализа воздействия ветровых нагрузок и собственного веса на конструкцию каркаса теплицы для выращивания сеянцев лесных культур сделаны следующие выводы:

максимальные напряжения, возникающие на каркасе теплицы под действием ветровой нагрузки и собственного веса, превышают допустимые;

наиболее нагруженным местом являлся узел на внутреннем поясе арки, где сходятся малый и большой радиусы поясов рядовых конструкций теплицы, для равномерности распределения напряжений необходимо обеспечить более плавный переход элементов конструкции внутреннего пояса;

одними из наиболее нагруженных мест рядовых конструкций являются узлы, приближенные к месту крепления арок к сваям, требуется выполнить разнесение наружного и внутреннего поясов у оголовка сваи, что позволит разгрузить узлы крепления арок к фундаменту;

для обеспечения существенного повышения прочности конструкции рекомендуется в 1,5 раза увеличить расстояние между внутренним и наружным поясами арки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авдеева Е.В., Ровных Н.Л., Иванов Д.В., Сухенко Н.В., Кухар И.В., Калинин М.Д. Российский и мировой опыт выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 4. С. 250–258.

Avdeyeva E.V., Rovnykh N.L., Ivanov D.V., Sukhenko N.V., Kukhar I.V., Kalinin M.D. Russian and World Experience in Growing Planting Material with a Closed Root System. *Khvoynye boreal'noy zony* = Conifers of the Boreal Area, 2022, vol. 40, no. 4, pp. 250–258. (In Russ.).

2. Алямовский А.А. SOLIDWORKS Simulation и FloEFD. Практика, методология, идеология. М.: ДМК Пресс, 2020. 658 с.

Alyamovskiy A.A. *SOLIDWORKS Simulation and FloEFD. Practice, Methodology, Ideology*. Moscow, DMK Press Publ., 2020. 658 p. (In Russ.).

3. Ананьев Е.М., Азбаев Б.О., Суюндиков Ж.О., Рахимжанов А.Н., Ражанов М.Р. Использование посадочного материала с закрытой корневой системой в степной зоне // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. Вып. 46. С. 60–63.

Ananyev E.M., Azbayev B.O., Suyundikov Zh.O., Rakhimzhanov A.N., Razhanov M.R. The Use of Planting Material with Closed Root System in the Steppe Zone. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2016, no. 46, pp. 60–63. (In Russ.).

4. Бобушкина С.В., Мочалов Б.А., Шапошникова Л.В. Опыт выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой в Архангельской области // Леса и лесное хозяйство в современных условиях: материалы Всерос. конф. с междунар. участием, Хабаровск, 4–6 окт. 2011 г. / отв. ред. А.П. Ковалев. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2011. С. 81–84.

Bobushkina S.V., Mochalov B.A., Shaposhnikova L.V. Experience of Growing Planting Material with Closed Root System in Arkhangelsk Region. *Forests and Forestry in Current Conditions: Proceedings of the All-Russian International Conference, Khabarovsk, 4-6 October 2011*. Ed. by A.P. Kovalev. Khabarovsk, Dal'NIILKh Publ., 2011, pp. 81–84. (In Russ.).

5. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований. СПб.: Политехн. ун-т, 2016. 125 с.
Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. *Statistical Processing of Forestry Research Materials*. Sankt Petersburg, POLYTECH Publ., 2016. 125 p. (In Russ.).
6. Ву Ван Чыонг. Лесоводственно-экологические последствия комплексных рубок в осушаемых сосняках (на примере Ленинградской области): дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2018. 110 с.
Chyong Vu Van. *Silvicultural and Ecological Consequences of Complex Logging in Drained Pine Forests (a Case Study in the Leningrad Region)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2018. 110 p. (In Russ.).
7. Гоф А.А. Эффективность создания лесных культур сосны обыкновенной сеянцами с закрытой корневой системой в ленточных борах Алтая: дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2020. 169 с.
Gof A.A. *Efficiency of Scots Pine Forest Cultivation by Seedlings with Closed Root System in Ribbon Forests of Altai*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Ekaterinburg, 2020. 169 p. (In Russ.).
8. Долгушин В.А., Соляник С.С., Спирина А.В. Механика: Соппротивление материалов. Расчет элементов конструкций на прочность, жесткость и устойчивость. СПб.: СПбГАУ, 2019. 47 с.
Dolgushin V.A., Solyanik S.S., Spirina A.V. *Mechanics: Resistance of Materials. Evaluation of Constructional Components by Strength, Rigidity and Stability*. Saint Petersburg, SPbGAU Publ., 2019. 47 p. (In Russ.).
9. Корчагов С.А., Грибов С.Е., Обрядина О.Ю. Экономическая оценка создания лесных культур различным видом посадочного материала // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 5. С. 92–102.
Korchagov S.A., Gribov S.E., Obryadina O.Yu. Economic Appraisal of Forest Plantation Development by Kinds of Planting Material. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 5, pp. 92–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.5.92>
10. Кузнецов Ф.А., Сладкова Л.А., Крылов В.В. Моделирование ветровой нагрузки в программной среде SOLIDWORKS // Строительные и дорожные машины. 2020. № 12. С. 23–27.
Kuznetsov F.A., Sladkova L.A., Krylov V.V. Wind Load Modeling by SOLIDWORKS Software. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* = Construction and Road Building Machinery, 2020, no. 12, pp. 23–27. (In Russ.).
11. Лугинина Л.И., Иващенко Н.Н. Применение сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), выращенной по контейнерной технологии на вырубках Нижегородской области // Вестн. НГСХА. 2017. № 1(13). С. 25–31.
Luginina L.I., Ivashchenko N.N. Application of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Cultivated with Container Technology on Logging Areas of Nizhny Novgorod Region. *Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, 2017, no. 1(13), pp. 25–31. (In Russ.).
12. Родин А.Р., Васильев С.Б., Родин С.А., Савченкова В.А., Никитин В.Ф., Калашиникова Е.А. Теория и практика искусственного лесовосстановления. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 164 с.
Rodin A.R., Vasilyev S.B., Rodin S.A., Savchenkova V.A., Nikitin V.F., Kalashnikova E.A. *Theory and Practice of Artificial Reforestation*. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2019. 164 p. (In Russ.).
13. Черник Д.В., Авдеева Е.В., Логачев А.К., Черник К.Н., Ровных Н.Л. Исследование воздействия снеговой нагрузки на каркас теплицы для выращивания сеянцев с ЗКС в SolidWorks // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 4. С. 333–337.

Chernik D.V., Avdeyeva E.V., Logachev A.K., Chernik K.N., Rovnykh N.L. Study of the Effect of Snow Load on the Framework of Greenhouses for Growing Seedlings with Root-Balled Tree System in SolidWorks. *Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the Boreal Area*, 2022, vol. 40, no. 4, pp. 333–337. (In Russ.).

14. Черник К.Н., Черник Д.В. Анализ прочностных характеристик стрелы комбинированного манипулятора в среде SolidWorks // *Машиностроение: новые концепции и технологии: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 23 окт. 2020 г. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2020. С. 200–203.*

Chernik K.N., Chernik D.V. Strength Characteristics Analysis of Combined Crane Arm in SolidWorks Software. *Mechanical Engineering: New Concepts and Technologies. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists. Krasnoyarsk, October 23, 2020. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetnev Publ., 2020, pp. 200–203. (In Russ.).*

15. Clabo D.C., Clatterbuck W.K. Establishment and Early Development of Even-Age Shortleaf Pine-Hardwood Mixtures Using Artificially Regenerated Shortleaf Pine and Various Site Preparation and Release Treatments. *Forest Science*, 2020, vol. 66, no. 3, pp. 351–360. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxz082>

16. Dey D.C., Jacobs D., McNabb K., Miller G., Baldwin V., Foster G. Artificial Regeneration of Major Oak (*Quercus*) Species in the Eastern United States: A Review of the Literature. *Forest Science*, 2008, vol. 54, no. 1, pp. 77–106. <https://doi.org/10.1093/forestsience/54.1.77>

17. Yang A.-S., Juan Y.-H., Wen C.-Y., Su Y.-M., Wu Y.-C. Investigation on Wind Environments of Surrounding Open Spaces Around a Public Building. *Journal of Mechanics*, 2017, vol. 33, no. 1, pp. 101–113. <https://doi.org/10.1017/jmech.2016.47>

18. Ogilvy T.K., Legg C.J., Humphrey J.W. Diversifying Native Pinewoods Using Artificial Regeneration. *Forestry*, England, London, vol. 79, no. 3, pp. 309–317. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl018>

19. Zhang J., Webster J., Powers R.F., Mills J. Reforestation After the Fountain Fire in Northern California: An Untold Success Story. *Journal of Forestry*, 2008, vol. 106, iss. 8, pp. 425–430, <https://doi.org/10.1093/jof/106.8.425>

20. Zhang Y., Fu Y., Jia J., Luo X. An Approach to Automatic Boundary Segmentation of Solid Models Using Virtual Topology: Toward Reconstruction of Design Features. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 367–385. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa030>

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

К истории отечественного лесоводства

История лесного дела в России насчитывает более 300 лет и начинается со времени издания первых касающихся лесов указов Петра Великого. За это время произошло много важных для лесной отрасли нашей страны событий. Именно об этом повествует вышедшая в 2022 г. монография доктора сельскохозяйственных наук, профессора, главного научного сотрудника Института лесоведения РАН Михаила Дмитриевича Мерзленко «Очерки истории отечественного лесоводства».

Монография прослеживает историю зарождения и развития лесной науки в России от древности, деяний Петра I и вплоть до XX в. Подчеркнута необходимость знаний о государственном управлении лесами России, о нашем старейшем в мире высшем образовании в сфере лесного дела и тех приоритетах в области лесного хозяйства, которые исконно установлены в стране, а также о выдающихся исследователях, внесших существенный вклад в лесную науку. Книга говорит о важности и величии благородного труда отечественных лесоводов.

Монография включает 17 глав. В первой главе «Лес в древности» описан промежуток времени от последнего оледенения до царствования Алексея Михайловича, показано значение леса в жизни славян и других народов, приведены первые законы, касающиеся лесов. Со второй главы подробно рассматривается развитие отечественной лесной науки от эпохи Петра I до XX в., включая советский период.

Автор останавливается на важных вехах развития отечественного лесоводства: от кораблестроения и изысканий пионеров лесной науки до складывания системы образования в области лесной науки, решения вопросов лесоустройства, государственного управления лесами. Отечественным ученым отводится первостепенная роль в разработке многих лесоводственных вопросов. Это и полезащитное лесоразведение, зарождение образования в сфере лесного дела, лесное опытное дело и многое другое. Хочется отметить широту и глубину рассмотрения автором отдельных исторических вопросов. Монография изобилует фотографиями, в том числе раритетными. На основе архивных документов и редких литературных источников приводятся малоизвестные факты из истории отечественной лесной науки.

Большое внимание автор уделяет лесному хозяйству и лесоведам советского периода: Г.Ф. Морозову, М.М. Орлову, В.Н. Сукачеву, И.С. Мелехову, А.С. Яблокову и др. Годы, когда лесным хозяйством руководили Г.П. Мотовилов, В.Я. Колданов и особенно И.Е. Воронов и В.И. Рубцов, названы расцветом лесного хозяйства страны.

Завершает книгу глава «Историческая культурология лесоводства». Глава наглядно показывает, какой престиж имела профессия лесоведа в XIX и XX вв. и что, к сожалению, происходит сегодня. Перечислены основные причины падения престижа профессии лесоведа, отмечено неизбежное отражение этого факта на этике и культуре современного специалиста лесного хозяйства.

Рецензируемая книга – это весомый вклад автора в отечественное лесоводство и науку о лесе в целом. Книга повествует о важности профессии лесоведа, полезна не только ученым-лесоведам и практикам лесного хозяйства, но и заинтересует обучающихся по направлению «Лесное дело», ученых смежных отраслей, историков, краеведов.

И.В. Евдокимов

Филиал ФГБУ «Рослесинфорг» «Севлеспроект»
igorevd1@rambler.ru