

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

5/377

2020

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

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

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

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

5/377

2020

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof., Academician of the Russian Academy of Natural History (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry Sciences, Prof., 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)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Selikhovkin A.V., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Telysheva G.M., Doctor of Chemistry, Prof. (Latvia, Riga)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Е.В. Робонен, Н.П. Чернобровкина, М.И. Зайцева, Б.В. Раевский, А.В. Егорова, Г.Н. Колесников.* Получение обогащенной L-аргинином древесной зелени при проведении лесохозяйственных мероприятий в молодняках сосны обыкновенной (научный обзор)..... 9
- А.В. Жигунов, Куинь Чанг Нгуен.* Введение *Eucommia ulmoides* Oliv. в культуру *in vitro*..... 38
- Н.Ф. Каплина.* Составляющие динамики прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого в нагорной дубраве южной лесостепи..... 51
- С.Р. Кузьмин.* Реакция ширины годичного кольца и доли поздней древесины у сосны обыкновенной на погодные условия в географических культурах... 64
- A.I. Smirnov, F.S. Orlov, P.A. Aksenov, Yu.V. Yaskov.* The Effectiveness of Low Frequency Electromagnetic Field and Hydrogel Influence on Survival Rate and Growth of Red Oak (*Quercus rubra* L.) Annual Seedlings..... 81
- А.В. Туюнен, В.В. Тимофеева, А.Ю. Карпечко, Ю.Н. Ткаченко, В.А. Карпин, Н.В. Петров.* Рекреационные изменения компонентов лесных экосистем на примере объекта культурного наследия «Беломорские петроглифы» (Республика Карелия)..... 90
- П.А. Феклистов, Н.М. Бызова, А.И. Пашкевич, Е.В. Сазанова, А.Н. Соболев.* Дендрохронологическое исследование древесины в исторически значимых арктических объектах..... 106
- A.P. Tsarev, V.A. Tsarev, R.P. Tsareva, N.V. Laur.* Evaluation of Ecological Plasticity and Stability of Some Promising Varieties of Poplars..... 119

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, О.А. Куницкая, О.И. Григорьева.* Прогнозная модель воздействия трелевочной системы на лесной почвогрунт в сложных сезонно-климатических условиях..... 131
- Д.Г. Мясищев, Д.Н. Шостенко, А.В. Серебренников.* Потребление топлива порталным лесохозяйственным трактором с учетом стохастических факторов 145

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, Е.А. Памфилов, А.Я. Данилюк, В.В. Капустин.* Модифицирование древесины для создания подшипников скольжения лесопромышленных машин..... 155
- В.Н. Глухих, А.Г. Черных.* Обоснование овальности формы сечений стволов деревьев при их росте с наклоном..... 166
- М.А. Зырянов, С.О. Медведев.* Моделирование процессов получения древесноволокнистых полуфабрикатов в целях расширения сырьевой базы лесопромышленных предприятий..... 176

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Д.Е. Лахманов, Ю.Г. Хабаров, В.А. Вешняков, М.Р. Ёкубжанов.* Нитрование гидролизного лигнина в водно-апротонных средах..... 184
- Х.А. Бабаханова, З.К. Галимова, М.М. Абдуназаров, И.И. Исмаилов.* Целлюлозная масса из коры веток тутовника для бумажной отрасли..... 193

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- М.Д. Мерзленко.* Основные итоги лесокультурного наследия лесовода К.Ф. Тюрмера..... 201
-



СОДЕРЖАНИЕ

FORESTRY

<i>E.V. Robonen, N.P. Chernobrovkina, M.I. Zaitseva, B.V. Raevsky, A.V. Egorova, G.N. Kolesnikov.</i> Obtaining Woody Greens Enriched with L-Arginine during Forestry Management of Young Scots Pine Stands (Scientific Review).....	9
<i>A.V. Zhigunov, Q.T. Nguyen.</i> Introduction of <i>Eucommia ulmoides</i> Oliv. to <i>in vitro</i> Culture.....	38
<i>N.F. Kaplina.</i> Components of the Increment Dynamics of Early and Late Wood of <i>Quercus robur</i> Stem in the Upland Oak Forest of the Southern Forest-Steppe	51
<i>S.R. Kuzmin.</i> Response of Annual Ring Width and Latewood Content of Scots Pine to Weather Conditions in Provenance Trials.....	64
<i>A.I. Smirnov, F.S. Orlov, P.A. Aksenov, Yu.V. Yaskov.</i> The Effectiveness of Low Frequency Electromagnetic Field and Hydrogel Influence on Survival Rate and Growth of Red Oak (<i>Quercus rubra</i> L.) Annual Seedlings.....	81
<i>A.V. Tuyunen, V.V. Timofeeva, A.Yu. Karpechko, Y.N. Tkachenko, V.A. Karpin, N.V. Petrov.</i> Recreational Changes in the Forest Ecosystem Components: Case Study of the Cultural Heritage Site “White Sea Petroglyphs” (Republic of Karelia)...	90
<i>P.A. Feklistov, N.M. Byzova, A.I. Pashkevich, E.V. Sazanova, A.N. Sobolev.</i> Dendrochronological Studies of Wood at Historically Significant Sites of the Arctic.....	106
<i>A.P. Tsarev, V.A. Tsarev, R.P. Tsareva, N.V. Laur.</i> Evaluation of Ecological Plasticity and Stability of Some Promising Varieties of Poplars.....	119

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>S.E. Rudov, V.Ya. Shapiro, I.V. Grigorev, O.A. Kunitskaya, O.I. Grigoreva.</i> A Predictive Model of the Impact of the Skidding System on Forest Soil in Severe Climatic Conditions.....	131
<i>D.G. Myasishchev, D.N. Shostenko, A.V. Serebrennikov.</i> Fuel Consumption of a Straddle Forestry Tractor in Consideration of Stochastic Factors.....	145

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>G.A. Pilyushina, P.G. Pyrikov, E.A. Pamfilov, A.Ya. Danilyuk, V.V. Kapustin.</i> Modifying Wood for Creation Plain Bearings of Timber Machines.....	155
<i>V.N. Glukhikh, A.G. Chernykh.</i> Reasoning of Tree Cross Sections Oval Shaping while Growing with an Inclination.....	166
<i>M.A. Zyryanov, S.O. Medvedev.</i> Modeling the Production Processes of Wood-Fiber Semi-Finished Products Aimed at Expansion of the Raw Material Base of Forest Enterprises.....	176

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- D.E. Lakhmanov, Yu.G. Khabarov, V.A. Veshnyakov, M.R. Yokubjanov.* Nitration of Hydrolysis Lignin in Water-Aprotic Solvent Mixtures..... 184
- Kh.A. Babakhanova, Z.K. Galimova, M.M. Abdunazarov, I.I. Ismailov.* Cellulose Pulp from Mulberry Branch Bark for the Paper Industry..... 193

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- M.D. Merzlenko.* The Major Results of the Silvicultural Heritage of the Forester K.F. Turner..... 201
-



УДК 630*236:582.475:577.112.385.2
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-9-37

ПОЛУЧЕНИЕ ОБОГАЩЕННОЙ L-АРГИНИНОМ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В МОЛОДНЯКАХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (НАУЧНЫЙ ОБЗОР)

Е.В. Робонен¹, науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0001-7926-8672),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

Н.П. Чернобровкина¹, д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

М.И. Зайцева², канд. техн. наук; ResearcherID: [P-2238-2015](https://orcid.org/0000-0003-4209-2815),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-2815>

Б.В. Раевский¹, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [K-6424-2018](https://orcid.org/0000-0002-1315-8937),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-8937>

А.В. Егорова¹, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

Г.Н. Колесников², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-1553-2014](https://orcid.org/0000-0001-9694-0264),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

¹Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: er51@bk.ru, chernobr@krc.karelia.ru, egorova.anast@mail.ru, borisraevsky@gmail.com

²Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: 2003bk@bk.ru, kolesnikovgn@yandex.ru

Леса продуцируют огромное количество органического вещества – возобновляемого сырья для производства технических, кормовых, пищевых и фармацевтических продуктов. Лесозаготовительная и деревообрабатывающая промышленность Карелии, как и в целом по России, применяет исключительно стволую древесину. В процессе рубок спелых и перестойных насаждений, рубок ухода, а также выполнения мероприятий по охране, защите и воспроизводству лесов, предусматривающих рубку лесных насаждений, образуется древесная зелень. Разработка технологий использования древесной зелени необходима для осуществления многоцелевого освоения всей фитомассы, продуцируемой лесными растительными сообществами. Развитие производств по переработке образующихся в процессе рубок ухода и обрезки сучьев тонкомера, низкокачественной и малоценной лиственной древесины, древесной зелени, являющихся сырьем для изготовления биологически активных препаратов различного действия, позволяет не только сократить расходы, но и обеспечивает прибыльность этих мероприятий. В настоящее время в нашей стране остро стоит задача увеличения объемов использования собственных, импортозамещающих фармацевтических субстанций, поиска альтернативных способов получения сырья для питательных смесей, кормовых продуктов. Для освоения новых сырьевых источников разрабатываются технологии модификации биохимического состава древесной зелени хвойных с получением растительного сырья, обогащенного целевыми биологически активными веществами. Водорастворимая фракция древесной зелени хвойных содержит в своем составе свободные аминокислоты, в частности L-аргинин, играющий важную роль в жизнедеятельности животных. Перспективным является способ повышения в хвойном сырье содержания свободных аминокислот и изменения их количественного соотношения путем регуляции режима минерального питания древесных растений. Для получения

хвойной древесной зелени, обогащенной L-аргинином, предлагается оригинальная схема дополнительного обеспечения растений азотом и бором. Использование хвойных растений в качестве биопродуцентов L-аргинина и изучение его метаболизма с учетом климатических факторов, условий минерального питания, сезонной и суточной динамики в естественной среде, поиск путей повышения его уровня в органах и тканях актуальны как в теоретическом, так и практическом аспектах. Получение хвойной древесной зелени, обогащенной L-аргинином, позволит организовать производство хвойных продуктов нутриентного и фармацевтического назначения. Для оценки экономической целесообразности организации такого производства необходимо проанализировать: потенциальные источники сырья на предмет их доступности; затраты на обогащение хвои L-аргинином; выход продукта с единицы площади. Разработана последовательность лесохозяйственных мероприятий как в процессе осуществления различных видов использования лесов, так и при проведении работ, направленных на повышение продуктивности лесов, сохранение их полезных функций. При этом в молодняках сосны обыкновенной появляется возможность превратить затратные виды мероприятий (осветление, прочистка, внесение удобрений) в доходные с получением дополнительного продукта. Технологии целенаправленного изменения химического состава и фармакологических свойств растительного сырья из древесных растений позволят осваивать новые сырьевые источники биологически активных веществ.

Для цитирования: Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Зайцева М.И., Раевский Б.В., Егорова А.В., Колесников Г.Н. Получение обогащенной L-аргинином древесной зелени при проведении лесохозяйственных мероприятий в молодняках сосны обыкновенной (научный обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 9–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-9-37

Финансирование: Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН) и по Программе развития опорного университета ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет».

Ключевые слова: лесные культуры, рубки ухода, азот, бор, удобрения, сосна обыкновенная, древесная зелень, L-аргинин, ресурсосбережение.

Введение

Леса, являющиеся источником древесных и недревесных ресурсов, а также широкого спектра экосистемных услуг, занимают в общем природно-ресурсном потенциале России важное место [14, 35, 43]. Органическое вещество, продуцируемое лесами, – это гигантский возобновляемый источник сырья для производства технических, нутриентных и фармацевтических продуктов. Важно организовать рациональное использование всех лесных ресурсов, сохраняя при этом высокую продуктивность леса, обеспечить переход от моноресурсного лесопользования к полиресурсному [47, 49, 72]. Лесозаготовки осуществляются преимущественно в бореальных лесах, которые занимают около 65 % лесной площади [70]. Уровень глубокой переработки лесных ресурсов в России, обладающей почти 1/4 мировых запасов древесины всех пород, явно не отвечает ее ресурсному потенциалу [44]. Отечественные производители ориентированы преимущественно на низкомаржинальные сегменты – круглый лес, пиломатериалы, фанерный шпон.

Лесозаготовительная и деревообрабатывающая промышленность в Карелии, как и в целом по России, основывается почти исключительно на использовании стволовой древесины. Остаются в лесу низкокачественная древесина, ветви, хвоя, листья, масса которых, по разным оценкам, составляет

10...15 % массы ствола [26]. На древесную зелень приходится в среднем около 6 %, т. е. 60 м³ на 1000 м³ заготовленной древесины [69]. Огромным резервом является многоцелевое освоение всей продуцируемой лесными растительными сообществами фитомассы, в том числе древесной зелени.

Цель исследования – обзор литературы для обоснования целесообразности разработки биотехнологии обогащения L-аргинином древесной зелени хвойных, образующейся в процессе проведения различных видов лесохозяйственной деятельности, и получения из нее продуктов нутриентного и фармацевтического назначения.

Биологически активные вещества хвои и их использование

Применение отходов лесного комплекса, разработка ресурсосберегающих технологий способствуют максимальному использованию местного сырья. Древесная зелень хвойных содержит комплекс веществ, обладающих высокой биологической активностью и представляющих практически все классы органических соединений, содержащихся в растениях [84].

Органические вещества, образующие растительную клетку, представлены целлюлозой, лигнином, гемицеллюлозами, экстрактивными компонентами. В ходе исследования биохимического состава хвои установлено, что она богата витаминами, ферментами, микроэлементами, фитонцидами, липидами, белками и др. [66]. Полученная информация использовалась при разработке продуктов фармацевтического и нутриентного назначения, производство которых осуществлялось на лесохимических предприятиях. В основе технологий – исследования, проведенные на базе Ленинградской лесотехнической академии под руководством Ф.М. Солодкого, Г.В. Пигулевского, Б.Н. Рутковского, А.П. Пентегова [66].

Разработка научных основ использования древесной зелени осуществлялась в 70–80-е гг. в Институте леса Карельского филиала АН СССР под руководством С.С. Зябченко [31]. Были получены сведения о ресурсах древесной зелени хвойных пород в лесах Карелии, данные о количестве некоторых биологически активных веществ (БАВ) в ней, проработаны вопросы технологии заготовки древесной зелени и производства хвойно-витаминной муки [31]. Большое внимание было уделено построению моделей возрастной динамики таксационных признаков и распределения различных фракций фитомассы для оценки полного биоресурсного потенциала древостоев и прогнозирования его изменения с возрастом, оценки запаса древесной зелени на 1 га и выхода древесной зелени со всей кроны в зависимости от толщины дерева. В результате этого на территории Карелии были организованы производства различных видов кормов из древесной зелени: веточного корма, веточных хлопьев, лесного силоса, витаминной муки и других продуктов для скормливания животным [31]. Ограничением при использовании древесной зелени является наличие дубильных веществ в листве (дуб, каштан, лещина) и смолистых веществ в хвое в летний период.

В настоящее время при разработке принципов лечебного питания, изыскании новых сырьевых источников для кормопроизводства и фармацевтики привлекаются данные из этноботанической и этномедицинской литературы [95]. Хвоя издавна использовалась в медицине и сельском хозяйстве. Чай, отвары и пиво готовили из хвои елей и сосен, использовали для лечения симптомов цинги. Жители лесных районов скормливали хвойную лапку скоту при авитаминозах, кишечных, респираторных заболеваниях и недостатке грубых кормов [10].

Установлено, что свежая хвоя сосны и ели способствует заметному снижению зараженности овец, свиней и птиц цестодами, аскаридиями, гетвракисами, стронгилятами, фасциолами и др. Менее эффективно обеззараживает животных от паразитов мука из высушенной хвои сосны и ели [21]. Практика использования хвои в животноводстве подтвердила не только ее высокую витаминную ценность, но и необходимость учитывать большое содержание в ней эфирных масел, смол, танидов и гликозидов, не позволяющих применять ее в больших количествах без соответствующей обработки (пропаривание, высушивание или измельчение на хвойную муку, экстрагирование БАВ) [31].

Успехи в области химии природных соединений и биотехнологии расширили возможности применения экстрактивных веществ, получаемых из растительного сырья [27, 59]. БАВ растительного происхождения входят в состав многих лекарственных препаратов. Ведутся работы по созданию более эффективных лекарственных форм, новых технологий их производства на основе природных соединений биомассы дерева [41]. Для сокращения затрат на корма в целях повышения рентабельности животноводства приоритетное значение имеет обеспечение рационального использования ресурсов на основе широкого применения инновационных технологий, биологизации и экологизации производства. Исторический опыт развития фармации и фармакологии указывает на приоритетность соединений природного происхождения при создании лекарственных препаратов различного действия [58]. Растущий спрос на БАВ и истощение традиционных ресурсов растительного сырья требует изыскания новых сырьевых ресурсов. Выявление новых источников БАВ, представляющих практическую значимость, является актуальной задачей. Однако крупномасштабное использование природных источников БАВ, многотоннажная их заготовка может привести к экологическим проблемам. Применение древесной зелени, напротив, способствует решению природоохраных задач [60, 61].

А.Д. Беззубов отмечает, что более 200 лет назад в России хвою использовали для лечения цинги и даже экспортировали в Западную Европу, применяли во время русско-шведской войны [9]. Известно, что, начиная с ноября 1941 г., в блокадном Ленинграде в рамках мероприятий по предупреждению авитаминоза было организовано производство витаминного настоя. В качестве источника аскорбиновой кислоты использовали хвою. Известно, что при лечении некоторых заболеваний применяют флавоноиды и другие фенолы, аскорбат, глутатион, витамин Е и β -каротин из древесной зелени и коры хвойных [112].

Аргинин хвойных нутриентного и фармацевтического назначения

Водорастворимая фракция древесной зелени хвойных содержит в своем составе свободные аминокислоты, которые могут использоваться в качестве компонентов лечебного питания. Известно, что у некоторых видов сосен аргинин является одним из основных компонентов белков семян и составляет значительную часть пула свободных аминокислот в проросших семенах и сеянцах [117]. Он может в значительном количестве присутствовать в составе свободных аминокислот хвои сосны обыкновенной. Хвойные растения содержат образованные из L-аргинина гуанидиновые соединения – потенциальные терапевтические агенты для регулирования различных NO-синтаз в случаях, когда перепроизводство оксида азота связано с септическим шоком,

нейродегенерацией, воспалением. Предложена гипотеза о нутриентной и синергической роли L-аргинина и его метаболитов, дополняющих роль витамина С [95].

Разработка и внедрение технологии производства фармацевтических субстанций, галеновых и новогаленовых препаратов из обогащенной L-аргинином хвои позволяет сократить импорт дорогостоящих лекарственных препаратов для медицинской и ветеринарной практики. L-аргинин входит в состав многих терапевтических и противовирусных средств. Являясь источником образования оксида азота – мощного сосудорасширяющего фактора и нейромедиатора, он применяется в кардиологии и иммунологии, замедляет рост доброкачественных и злокачественных опухолей, способствует заживлению ран, регулирует выработку гормонов, используется при заболеваниях почек, в лечении цирроза печени. Применяется в сельском хозяйстве: его добавление к кормам, наряду с лизином и метионином, способствует быстрому росту животных, повышению их продуктивности. Высокой потребностью в L-аргинине отличаются хищные животные, рыбы, домашняя птица.

Перспективы биотехнологии обогащения L-аргинином древесной зелени хвойных

Технологии модификации биохимического состава древесной зелени хвойных с получением растительного сырья, обогащенного целевыми БАВ, разрабатываются для освоения новых сырьевых источников, обеспечивающих производство продуктов фармацевтического и нутриентного назначения. Предложена технология обогащения хвойной древесной зелени L-аргинином и получения из нее хвойных препаратов – хвойной муки и водного хвойного экстракта [60, 61, 78–82]. Имеются положительные результаты испытаний аргининового хвойного экстракта при выращивании щенков пушных зверей на примере американской норки (*Mustela vison* Shr.) [53, 75]. Хвойная мука, обогащенная L-аргинином, в качестве кормовой добавки повышала рост и продуктивность сельскохозяйственной птицы [52]. Технология основывается на оригинальной схеме дополнительного обеспечения хвойных растений азотом и бором [60, 61, 78, 79, 81, 82].

Минеральное питание и свободные аминокислоты хвойных

Для эффективного использования всех частей дерева важно иметь информацию об относительной локализации БАВ в его органах и тканях, закономерностях их накопления во временном аспекте, в связи с условиями роста, для разных возрастных групп. Учитывая возможную перспективу использования хвойных растений в качестве биопродукторов L-аргинина, необходимо изучать его метаболизм с учетом климатических факторов и условий минерального питания, в сезонной и суточной динамике [62, 82]. Известно, что у хвойных растений с L-аргинином и его производными непосредственно связаны процессы перехода в состояние зимнего покоя и подготовки к распусканию почек весной [96, 97]. Для лучшего понимания роли метаболизма аргинина в эффективности использования азота растениями исследуются регуляторные механизмы, ответственные за его содержание в органах и тканях, определяющие преобладание процессов запаса или метаболизации азота, образование оксида азота как сигнального агента роста, размножения или защиты от стрессов [163].

Небелковой фракции, которая в основном представлена свободными аминокислотами, принадлежит большая роль в азотном обмене древесных расте-

ний [48]. Свободные аминокислоты используются в синтезе белков, нуклеиновых кислот и многих азотсодержащих веществ, а также участвуют в образовании органических кислот, сложных углеводов и липидов, они тесно связаны с процессами роста и развития растений. Изменение состава свободных аминокислот в тканях хвойных растений может происходить вследствие разбалансированности минерального питания или других неблагоприятных условий среды [1, 82, 83, 103, 109, 136]. На многих видах растений показано накопление богатых азотом аминокислот в ответ на высокую обеспеченность азотом и низкую – фосфором [161]. В пуле свободных аминокислот у хвойных растений на богатых азотом почвах обычно доминирует L-аргинин [133, 136], повышается также содержание орнитина и лизина. Синтез L-аргинина может быть вызван недостатком других макро- и микроэлементов и, предположительно, является общей реакцией на стрессы, снижающие рост, а не на доступность какого-то конкретного элемента питания [133]. Увеличивая содержание отдельных аминокислот в растениях, можно получить растительный материал с новыми свойствами, повысить питательную ценность продуктов из него, улучшить защиту растений от вредителей [83].

Хвойные леса, как правило, растут на кислых подзолистых лесных почвах, которые испытывают недостаток азота. Кроме азота, дефицитным для роста хвойных в условиях Фенноскандии является бор [81, 162]. Дефицит азота и бора заметно отражается на росте и развитии древесных растений. Их обеспеченность азотом и бором тесно взаимосвязаны – при повышении содержания ионов NH_4^+ в почвенном субстрате снижается поступление бора в растения, что отражается на поглощении ими азота. Внесение азота в высоких дозах может приводить к разбалансированности минерального, прежде всего фосфорного, питания, ограничению интенсивности фотосинтеза [98, 153].

На основании выявленных закономерностей, касающихся механизмов детоксикации высоких доз азота у хвойных растений в связи с обеспеченностью бором, накопления и распределения L-аргинина в кроне сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при регуляции азотного и борного обеспечения, разработана биотехнология получения хвойных препаратов, обогащенных L-аргинином – аргининового иммуностимулятора и хвойной муки. Для внедрения технологии в практику необходимо изыскание возможных источников древесной зелени. При этом надо учитывать, что технологический процесс, приводящий к образованию древесной зелени, должен обеспечивать включение дополнительной операции – внесение азотно-борных удобрений.

Утилизация отходов различных видов лесохозяйственной деятельности

Древесная зелень образуется в процессе проведения лесосечных работ, связанных с заготовкой древесины и другими видами использования лесов, а также с выполнением мероприятий по охране, защите и воспроизводству лесов, предусматривающих рубки лесных насаждений (см. таблицу). К мероприятиям, направленным на повышение продуктивности лесов, сохранение их полезных функций, в результате проведения которых образуется древесная зелень, относятся рубки ухода, обрезка сучьев и ветвей.

**Мероприятия лесохозяйственной деятельности, сопровождающиеся
образованием древесной зелени сосны обыкновенной**

Мероприятие	Содержание работ	Возрастной интервал насаждения и иные его характеристики
<i>Использование лесов</i>		
Заготовка древесины	Полное или частичное удаление деревьев	С наступлением спелости леса
Выполнение работ по геологическому изучению недр, разработка месторождений полезных ископаемых	Полное удаление древесно-кустарниковой растительности	Без ограничений
Строительство и эксплуатация водохранилищ и иных искусственных водных объектов, гидротехнических сооружений и т. д.		
Строительство, реконструкция, эксплуатация линейных объектов		
Реконструкция, эксплуатация линейных объектов	Расчистка трасс ЛЭП, удаление древесно-кустарниковой растительности*	Молодняк древесных растений до 4 м высотой
<i>Охрана, защита и воспроизводство лесов</i>		
Уход за насаждением	Рубки ухода в молодняках	Осветление (до 10 лет) Прочистка (до 20 лет)
	Уход в средневозрастных древостоях*	Прореживание. Жердняковый этап (21–40 лет)
	Рубки в приспевающих древостоях	Проходные рубки. Последний этап (за 20 лет до главной рубки)
Уход за опушками	Вырубка до полноты 0,4–0,5. Ширина 20...25 м по границе с безлесными пространствами, 5...10 м вдоль дорог, ЛЭП	Древостои не старше 50–60 лет
Уход за формой ствола и качеством древесины	Обрезка сучьев и ветвей с доведением бессучковой части ствола до 6...7 м*	В возрасте прореживания (повторяется через 4–6 лет)

*Мероприятия, перспективные для получения древесной зелени, обогащенной L-аргинином.

Одно из основных мероприятий, определяющих рентабельность всего цикла лесовыращивания, – рубки ухода в молодняках, которые проводятся в насаждениях до 20 лет [3]. Низкий процент выполнения рубок ухода объясняется высокой затратностью этих работ [42]. После рубок ухода, обрезки ветвей, внесения удобрений увеличивается размер деревьев разреженного древостоя,

изменяется его качество [64]. Экономическим стимулом для проведения рубок ухода в молодняках и средневозрастных насаждениях является обеспечение прибыльности мероприятия путем развития производств по переработке и использованию тонкомера, низкокачественной и малоценной лиственной древесины. Рассматривается возможность применения недревесных волокнистых материалов для производства целлюлозы [120]. Многочисленные опыты доказали реальность изготовления качественной технологической щепы из тонкомерной древесины хвойных и лиственных пород [18]. Перспективно ее использование в качестве энергетического сырья [4, 68, 102, 145, 146]. Для получения газообразного и жидкого биотоплива применяют термохимическую переработку отходов, образующихся при заготовке лесных ресурсов [63], в том числе и сверхкритическую флюидную экстракцию, которая превосходит экстракцию водяным паром по разнообразию и количеству экстрагируемых веществ. Развиваются технологии использования низкокачественной и малоценной древесины в строительных конструкциях [12]. Разрабатываются способы импрегнации тонкомера осины и сосны для изготовления элементов кровли в деревянном домостроении [11, 12, 37, 56]. Перспективна также заготовка и переработка древесной зелени, которая может стать сырьем для производства БАВ различного действия [15, 59, 71, 77, 79]. Показано ростостимулирующее и защитное действие экстрактов из древесной зелени хвойных и лиственных пород при выращивании семян сосны обыкновенной [23, 24]. Предложена принципиально новая технология получения стимулятора роста для сосны из растущих листьев ивы козьей с учетом временной составляющей отбора сырья [25, 55]. Разработаны новые агротехнические приемы выращивания посадочного материала в теплично-питомнических комплексах с применением компонентов субстрата из древесной зелени хвойных и лиственных пород [28, 54].

Потенциальные источники обогащенной L-аргинином древесной зелени

Анализ потенциальных источников сырья (хвои, обогащенной L-аргинином) с учетом их доступности, объемов, затрат на проведение мероприятий по обогащению хвои L-аргинином, количества получаемого продукта с единицы площади необходим для оценки экономической целесообразности организации такого производства.

Получение обогащенной L-аргинином хвои в процессе заготовки древесины представляется трудно осуществимым в связи с тем, что для этого требуется четкая увязка планов лесозаготовителей с проведением подготовительных работ по внесению удобрений. Кроме того, такое внесение удобрений будет бесполезным с точки зрения последующего лесовосстановления, искусственного или естественного. Более того, оно может привести к более интенсивному росту сорной растительности, интенсивному задернению вырубki, что будет препятствовать процессу последующего лесовосстановления. Внесение удобрений до рубки главного пользования могло бы оказаться полезным в случае реализации предварительного возобновления, но, учитывая трудности сохранения подростa в процессе рубки материнского насаждения с помощью современной лесозаготовительной техники, применяют этот способ в основном в лесодефицитных районах страны [45], что для Карелии не актуально.

Источником сырья может являться древесная зелень, образующаяся при выполнении работ по геологическому изучению недр, разработке месторождений полезных ископаемых, строительству и эксплуатации водохранилищ и иных искусственных водных объектов, гидротехнических сооружений, возведению линейных объектов.

Расчистка трасс линий электропередачи (ЛЭП), а также других линейных объектов от древесно-кустарниковой растительности является комплексом ручных и механизированных лесосечных работ по валке, корчевке или обрезке деревьев и кустарников для прокладки или поддержания трасс в надлежащем порядке. В больших количествах древесная зелень образуется в процессе вырубке трасс при строительстве дорог, ЛЭП, нефте- и газопроводов, а также при их реконструкции и эксплуатации (см. таблицу).

Расчистка трасс под ЛЭП при эксплуатации. Проблема расчистки трасс под ЛЭП актуальна для многих энергосистем России. Заращение просек древесно-кустарниковой растительностью приносит большой экономический ущерб, вызывая аварии, работы по расчистке трасс ЛЭП необходимы для обеспечения надежности энергоснабжения потребителей. Проведение расчисток требуется через каждые 5–15 лет, в зависимости от породы деревьев и почвенно-климатических условий. Для удаления или измельчения древесно-кустарниковой растительности при расчистке трасс линейных объектов разрабатываются специализированные машины и навесные агрегаты [44, 50]. Использование древесной зелени, получаемой при расчистке трасс ЛЭП, в качестве сырья для получения БАВ позволило бы сократить расходы по обслуживанию трасс [61]. При этом вырубается обычно молодняки до 4 м высотой, что регламентируется техническими требованиями по эксплуатации таких объектов.

Древесная зелень от рубок ухода. Рациональным представляется обогащение древесной зелени L-аргинином при осуществлении мероприятий по охране, защите и воспроизводству лесов (см. таблицу). При выстраивании последовательности таких затратных работ по уходу в молодняках сосны, как рубки прочистки и прореживания, обрезка ветвей и внесение удобрений, имеется возможность сократить расходы за счет получения дополнительного продукта. Планирование работ и их корректировка должны проводиться на основе построения экономически эффективных цепочек мероприятий [40]. Рубки ухода необходимы для формирования высокопродуктивных насаждений из целевых древесных пород [33, 64, 65, 73], поддержания древостоя на максимуме текущего прироста и улучшения его товарной структуры [40]. Качественное и своевременное их выполнение позволяет повысить размер пользования древесиной с единицы лесной площади и является серьезным дополнительным источником древесного сырья [46]. Активно исследовалось влияние прореживания на рост деревьев в чистых насаждениях сосны обыкновенной и качество получаемой древесины [13, 20, 45, 91, 93, 94, 127, 137, 143]. Значительное внимание уделялось выработке критериев оценки эффективности мероприятий. Воздействие прореживания на состояние и продуктивность насаждения оценивали по изменению площади поперечного сечения стволов, сухой массы, содержанию углерода и азота. Влияние на биологическую устойчивость характеризовали показателем жизненного состояния. Для оценки общего состояния растения и его энергетического баланса при оптимизации параметров разреживания в качестве информативного показателя предлагается использовать интенсивность дыхания корней [30]. Объективным критерием для установления возраста проведения последующих приемов рубок может рассматриваться текущий прирост по диаметру [33].

Показано, что прирост товарного объема не уменьшался со снижением плотности насаждений в широком диапазоне [99, 134]. Прореживание способствовало росту оставшихся деревьев за счет снижения конкуренции за ресурсы благодаря увеличению размеров кроны, массы листвы у оставшихся деревьев, повышению ее фотосинтетической способности в условиях улучшения освещенности нижней части кроны [85, 121, 143]. Оптимизацией почвенно-светового ресурса можно значительно повысить продуктивность сосняков [32]. Разреживание может влиять на рост деревьев за счет микроклиматических условий. Изменение характеристик, определяющих качество древесины, косвенно контролируется размером, распределением и эффективностью листовых органов [121]. Большинство прореживаний, как правило, способствует развитию кроны в начале сезона, что обеспечивает увеличение ширины годичных колец, доли ранней древесины и переходных трахеид в годичном кольце. В некоторых ситуациях прореживание может также повысить продуктивность хвои и сезонную продолжительность формирования древесины [121]. Отмечено снижение риска верхового пожара благодаря уменьшению объемной плотности полога в результате интенсивного разреживания [91].

Чтобы оптимизировать качественные характеристики формирующихся стволов в молодняке, необходимо найти оптимальный баланс между достаточной скоростью роста ствола и степенью увеличения диаметра кроны, содействовать самоочищению или проводить искусственную обрезку живых ветвей, обеспечивать оптимальный режим питания [121].

При экстенсивном ведении лесного хозяйства на Европейском Севере рубки ухода проводятся в недостаточных объемах [73]. Одна из основных причин – ограниченный сбыт древесины от рубок ухода. При этом возможность использования образующейся древесной зелени практически не рассматривается.

Древесная зелень от обрезки живых ветвей. Помимо рубок ухода, к некоммерческим мероприятиям по уходу за лесом, в процессе которых образуется древесная зелень, можно отнести искусственную обрезку сучьев и ветвей, уход за опушками. Обрезку в целях повышения качества стволов проводят в молодых сосновых насаждениях [134]. В результате обрезки живых ветвей (зеленой обрезки) протяженность кроны в вертикальном направлении снижается, большая часть ствола оказывается свободной от ветвей. Уменьшение кроны приводит к временному подавлению роста, но вскоре нижние ветви у нового основания кроны становятся крупнее и растут энергичнее. При интенсивной обрезке радиальный рост у основания ствола замедляется, а уровень, на котором образуются кольца максимальной ширины, смещается вверх к новому основанию кроны. Наблюдается снижение сбежистости ствола. Одновременно с этими изменениями в ширине годичного кольца доля поздней древесины и плотность увеличиваются в нижней части ствола [121].

У молодых деревьев в годичных кольцах, расположенных ниже основания новой кроны, обрезка способствует ускорению перехода от ювенильной к зрелой древесине. Во многом реакция дерева на обрезку живых ветвей противоположна реакции на прореживание. Как и при прореживании, эффекты обычно кратковременны. Картина роста возвращается к исходной в течение нескольких лет. Зеленая обрезка является трудоемкой и относительно дорогой процедурой [121]. Обрезку сучьев и веток применяют для улучшения качества

ствола, увеличения стоимости пиловочника. При интенсивном ведении лесного хозяйства она считается необходимой мерой ухода за лесом, примером выгоды капиталовложений [19, 86]. Обрезка значительно понижает сучковатость, являющуюся одним из главных сортоопределяющих пороков древесины. Сучки затрудняют обработку древесины, изменяют ее механические свойства [6]. При анализе сортообразующих пороков в партиях поставок сосны из среднетаежной подзоны Карелии установлено, что одним из основных видов пороков, понижающих сортность поступивших лесоматериалов, наряду с кривизной и гнилью, являются крупные сучья [57]. Практика лесопиления показывает, что наличие крупных сучьев значительно снижает сортность древесины и стоимость конечной продукции, а следовательно, и ее конкурентоспособность на рынке. В целях увеличения бессучковой зоны в нижней части ствола рекомендуется повышать возраст рубки, что еще увеличит срок окупаемости данного лесоводственного мероприятия. Заготовка и использование образующейся древесной зелени позволила бы сократить расходы на его проведение.

Удобрения и комплексные уходы

Общую оценку зависимости качества древесины хвойных от внесения удобрений дать не просто из-за большого количества влияющих факторов. Довольно сложно сравнивать результаты, полученные в разных лесорастительных условиях и разных регионах исследований. В экспериментах наблюдали как быструю и значительную реакцию на удобрения, так и менее выраженную или даже полное ее отсутствие [88, 92, 124, 148].

Исследования, связанные с ролью азота в лесном биогеоценозе, стали одним из основных направлений лесной науки со второй половины XX в. Результаты ранних экспериментов с использованием сельскохозяйственных удобрений в хвойных насаждениях оказались очень многообещающими [88, 106]. Во всем мире активно изучались биогеохимия этого часто лимитирующего элемента питания, воздействие азотных удобрений на рост лесных культур. Было проведено множество экспериментов по влиянию азотных удобрений на рост сосны на минеральных почвах [87, 100, 131, 148, 152, 155, 157]. Эти исследования включали внесение удобрений как однократно [39], так и многократно, с интервалами [17, 67, 110, 113, 114, 118, 128, 140] или ежегодно [106, 107, 135, 152]. У сосны удобрения усиливали рост хвои и увеличивали ее биомассу, активизировали митотическую деятельность камбия, повышали продуктивность [38]. Увеличение массы хвои особенно проявлялось через 2-3 года [148]. Росту в целом и развитию кроны внесение удобрений способствует, но у хвойных растений увеличение радиального прироста часто связывают с уменьшением плотности древесины [2], причем наиболее выражено это проявляется в нижней части ствола [131]. В настоящее время активно изучается влияние экзогенных факторов на плотность древесины [74]. По данным [121], процент поздней древесины в годичном кольце может быть сохранен, несмотря на рост ширины годичного кольца, благодаря увеличению массы листвы, эффективности фотосинтеза и продолжительности периода вегетации, происходящему в результате внесения удобрений. При некоторых обстоятельствах повышенная эффективность фотосинтеза может значительно увеличивать толщину клеточных стенок трахеид поздней древесины [121]. Разрабатываются прогностические модели, отражающие реакцию роста древесных растений

на удобрения, для расчета рентабельности лесохозяйственных мероприятий, а также оценки их воздействия на поглощение углерода лесной экосистемой в целях последующего определения приоритетности инвестиций [151].

Внесение на 1 га соснового насаждения в южной части Швеции 150 кг азота в форме нитрата аммония (NH_4NO_3) приводило к увеличению роста ствола сосны [148]. При такой дозе азота дополнительный прирост древесины сосны обыкновенной мог достигать $15 \text{ м}^3/\text{га}$, обеспечивая экономическую отдачу от инвестиций более 10 % в год [114]. Наиболее выраженное влияние азотных удобрений на рост сосны наблюдали в первые 5–10 лет после внесения, но незначительное воздействие сохранялось и в более отдаленные сроки [88, 101, 140]. Общая тенденция в долгосрочной перспективе, через 14–28 лет после внесения азотных удобрений, была положительной. При расчете индекса эффективности удобрений с точки зрения закрепления углерода обнаружено, что добавление азота в количестве 600...1800 кг/га способствовало дополнительному накоплению сосной обыкновенной около 30 кг углерода на 1 кг азота [88, 110].

Хорошая обеспеченность азотом может приводить к дефициту других элементов питания [107, 135], разбалансированности в обеспеченности фосфором и последующему ограничению интенсивности фотосинтеза [153]. Отмечалось снижение положительного влияния азотных удобрений на рост хвойных растений при их сочетании с известковыми материалами [148]. Предполагается, что это было вызвано дефицитом бора, так как появление характерных для него морфологических признаков (нарушение верхушечного роста, гибель вершин, снижение его концентрации в хвое сосны) наблюдали в экспериментах с применением извести [148].

Признаки дефицита бора при известковании были отмечены у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) в Скандинавии и сосны скрученной (*Pinus radiata* D. Don) в Новой Зеландии [90, 108, 129]. Они становились менее выраженными у этих видов при применении только борного удобрения или в комбинации его с азотом. Одним из наиболее очевидных эффектов от внесения азотных удобрений было увеличение концентрации азота в хвое в течение нескольких лет после воздействия [107, 113].

В 70–80-х гг. XX в. большое внимание было уделено вопросу о возможности избыточного поступления азота в лесные экосистемы. Приводятся примеры ингибирования роста древесных растений, увеличения доли отпада при воздействии высокими дозами азотных удобрений [124]. В рамках Международной совместной программы по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests) исследовали взаимосвязь между ростом древостоя и осаждением азота по информации, получаемой с сети участков на большей части Европы [92]. Положительное влияние азотных удобрений было выявлено на фоне низких уровней осаждения азота, не превышающих 10 кг/га в год. Абсолютный прирост леса был нелинейно связан с осаждением азота. Интенсификацию роста под действием азота наблюдали на почвах с низким содержанием элементов питания в отличие от почв с высоким их уровнем [92].

Конкуренция за свет, воду и питательные вещества влияет на показатели роста древесных растений. Для предотвращения чрезмерной конкуренции между деревьями проводят некоммерческие рубки (прореживание), сохраняя при этом достаточное количество деревьев в насаждении, гарантирующее высокую

продуктивность участка [92, 154, 159], а оптимизацию уровня обеспеченности элементами питания деревьев осуществляют внесением минеральных удобрений [144]. При совместном проведении эти мероприятия могут вызвать рост продуктивности, а также оказать значительное влияние на качество как насаждения в целом, так и отдельных деревьев в нем [94, 127, 146, 154].

Более высокие темпы роста могут приводить к более низкой плотности древесины доминирующих деревьев, чем у деревьев того же возраста с угнетенным ростом, что необходимо учитывать при планировании лесоводственных мероприятий [139, 147]. Поскольку результаты такого комплекса воздействий могут иметь большое практическое значение, были проведены подробные исследования свойств древесины, образующейся после его осуществления [111, 123, 126, 130, 131, 139, 154]. Увеличение радиального прироста у хвойных растений как результат внесения удобрений обычно ассоциируется с уменьшением плотности древесины, хотя литературные данные относительно влияния прореживания, обрезки и внесения удобрений на качество древесины имеют противоречивый характер [123, 131]. Показано, что комбинированное прореживание и внесение удобрений увеличивают общее производство сухого вещества на дерево в большей степени, чем суммарные эффекты обработок, применяемых по отдельности [156].

Оценка запаса древесной зелени

Лесное ресурсоведение требует точного подхода к изучению ресурсного потенциала, количественных и качественных характеристик надземной фитомассы древостоев в связи с лесорастительными условиями [7]. Необходимо выявление аллометрических закономерностей, получение информации о биомассе древостоя по компонентам дерева [145]. Хотя имеется огромное количество данных о продуктивности лесных насаждений, в основном это касается стволовой биомассы – наиболее экономически ценной части, в то время как другие наземные компоненты биомассы часто не учитываются [115]. Анализ множества эмпирических моделей, отражающих аллометрические зависимости и построенных для оценки биопродуктивности леса на основе данных относительно объемов стволовой древесины и биомассы преимущественно надземных компонентов дерева, проведен для основных лесобразующих видов Европы [164]. Выявление таких зависимостей необходимо для устойчивого планирования использования лесных ресурсов.

Большой объем данных относительно биомассы хвои и ветвей, более динамичного показателя, чем стволовой компонент биомассы, получен при проведении работ по оценке запаса углерода в надземной лесной экосистеме в долгосрочном аспекте [115, 116, 141]. В результате многочисленных исследований установлен ряд закономерностей в накоплении хвойной массы сосны обыкновенной [5, 8, 22, 34, 36, 76, 115, 116, 122, 158]. В опубликованных данных отражена зависимость накопления и распределения надземной биомассы от возраста насаждения, климатических условий, наличия питательных веществ [138, 142, 160]. Из-за различий в условиях произрастания может по-разному происходить формирование во времени распределения биомассы и аллометрии деревьев на различных участках [115, 125, 142, 158]. Большая часть эмпирических уравнений, описывающих надземную биомассу, построена для приспевающих и спелых насаждений, но в ряде исследований приводится информация относительно распределения надземной биомассы в

молодняках сосны обыкновенной, что необходимо для оценки запасов древесной зелени, пригодной к заготовке в качестве обогащенного биологически активными веществами растительного сырья.

Принцип безотходной переработки древесной зелени

Совершенствуются технологии лесозаготовки, лесопиления, ведения лесного хозяйства. Комплексная переработка лесных ресурсов предполагает развитие технологий максимально полного использования биомассы дерева, сокращения количества отходов [4, 16, 44, 63]. В последнее время во многих отраслях промышленности значительные усилия направляются на снижение зависимости от топлива и продуктов на основе нефти [150]. Рост производства пластмасс в различных сферах жизни привел к огромным проблемам с утилизацией пластиковых отходов, стала очевидной необходимость разработки новых, экологически чистых материалов. Экономически эффективна разработка композитов на основе натуральных волокон в качестве армирующего материала. Использование натуральных волокон, являющихся возобновляемыми, биоразлагаемыми материалами, активно возрождается [89, 119, 132]. В ряде исследований показано, что полученные из сосновой хвои натуральные волокна могут применяться в качестве армирующего материала в различных композитах, в том числе полимерных [104, 105, 149, 150]. Быстро растущий спрос на бумагу и картон привлек пристальное внимание к недревесным волокнистым материалам, в частности хвое сосны, для производства целлюлозы [120].

При изыскании новых технологий и совершенствовании известных способов рационального использования древесной фитомассы рассматривается техническая возможность применения отходов, полученных после извлечения водорастворимого L-аргинина из древесной зелени сосны обыкновенной, в качестве сырья для изготовления теплоизоляционных плит [29, 51]. С экологической точки зрения важной особенностью способа извлечения L-аргинина из предварительно измельченной хвои является использование воды в качестве экстрагента. Для получения предложенного материала специальной предварительной подготовки сосновой хвои не требуется, поскольку в процессе экстрагирования водорастворимого L-аргинина разрушается восковой покров, а частицы хвои частично дефибрируются, образуя экологически чистые отходы [29]. Кроме L-аргинина, получают отходы – тонкие волокна с большим отношением длины к толщине, пригодные для производства теплоизоляционных строительных материалов [29]. Совершенствование и внедрение технологии производства подобных продуктов соответствует принципу безотходной переработки древесной зелени.

Заключение

Разработка технологий использования древесной зелени является звеном многоцелевого освоения всей фитомассы, продуцируемой лесными растительными сообществами. Повышение рентабельности лесоводственных мероприятий (рубки ухода, обрезка сучьев, внесение удобрений), проводимых в молодняках и средневозрастных древостоях, можно осуществлять путем переработки образующейся древесной зелени. Использование древесной зелени, получаемой при расчистке трасс ЛЭП, позволит сократить расходы по их обслуживанию, сделать процесс максимально экономичным, ресурсосберегающим.

Высокая нутриентная ценность хвои подтверждена практикой животноводства, ее востребованность в фармакологии показана в историческом аспек-

те. Перспективной является технология повышения содержания свободных аминокислот и целевое изменение их количественного соотношения в древесной зелени путем регуляции режима минерального питания, модифицирующего биопроцентную направленность. L-аргинин играет важную роль в жизнедеятельности животных организмов и активно используется в производстве продуктов фармацевтического и нутриентного назначения. Технология целенаправленного изменения химического состава и фармакологических свойств растительного сырья из древесных растений позволит осваивать новые сырьевые источники БАВ. Оптимизация эффективности использования азота поможет совершенствовать условия культивирования хвойных, избегать негативных экономических и экологических последствий от чрезмерного внесения азотных удобрений в лесном хозяйстве. Построение специально разработанной последовательности лесохозяйственных мероприятий даст возможность получать хвою, обогащенную L-аргинином, как в процессе осуществления различных видов использования лесов, так и при проведении мероприятий, направленных на повышение продуктивности лесов, сохранение их полезных функций. В целях реализации принципа максимальной безотходности производства рассматривается техническая возможность использования отходов после извлечения водорастворимого L-аргинина из древесной зелени сосны обыкновенной в качестве сырья для изготовления теплоизоляционных плит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Свободные аминокислоты вегетативных органов *Picea obovata* L. и *Pinus sylvestris* L. // Химия раст. сырья. 2017. № 3. С. 85–91. [Alaudinova E.V., Mironov P.V. Free Amino Acids of the Vegetative Organs of *Picea obovata* L. and *Pinus sylvestris* L. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2017, no. 3, pp. 85–91]. DOI: [10.14258/jcprm.2017031763](https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031763)
2. Антонов А.М. Изменчивость макростроения древесины сосны, выращенной с применением удобрений // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 1. С. 179–183. [Antonov A.M. The Wood Macrostructure Variability of the Pine Grown with the Fertilizer Use. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2015, no. 1, pp. 179–183].
3. Антонов О.И. Повышение качественной продуктивности насаждений – задача интенсивного лесного хозяйства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 1. С. 86–94. [Antonov O.I. Qualitative Productivization of Forest Stands is the Goal of Intensive Forestry. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 86–94]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.1.86](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.86), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/63f/antonov.pdf>
4. Бабич Н.А., Клевцов Д.Н. Запасы энергии в культурах сосны // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2012. № 1. С. 38–41. [Babich N.A., Klevtsov D.N. Reserve of Energy in Pine Cultures. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 1, pp. 38–41].
5. Бабич Н.А., Клевцов Д.Н., Евдокимов И.В. Зональные закономерности изменения фитомассы культур сосны. Архангельск: Изд-во САФУ, 2010. 140 с. [Babich N.A., Klevtsov D.N., Evdokimov I.V. *Zonal Patterns of Change in the Pine Phytomass*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 140 p.].
6. Бабич Н.А., Мелехов В.И., Антонов А.М., Клевцов Д.Н., Коновалов Д.Ю. Влияние условий местопроизрастания на качество древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) в посевах // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 1. С. 54–58. [Babich N.A., Melikhov V.I., Antonov A.M., Klevtsov D.N., Konovalov D.Yu. The Influence of Site Conditions on the Quality of Pine Wood (*Pinus sylvestris* L.) in Plantings. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2007, vol. 24, no. 1, pp. 54–58].

7. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса культур сосны и ели в европейской части России. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 2004. 108 с. [Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *Phytomass of Pine and Spruce in European Russia*. Arkhangelsk, Severo-Zapadnoye knizhnoye izdatel'stvo, 2004. 108 p.].

8. Бальков Н.Г., Виликайнен Л.М., Робонен Е.В., Смирнов А.В. Распределение фитомассы в сосняке лишайниковом // Лесоведение. 1989. № 6. С. 57–63. [Balykov N.G., Vilikainen L.M., Robonen E.V., Smirnov A.V. Phytomass Distribution in Lichen Pine Forest. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1989, no. 6, pp. 57–63].

9. Беззубов А.Д. Витамины для блокадного Ленинграда // Химия и жизнь. 1985. № 1. Режим доступа: http://www.infran.ru/vovenko/60years_wv2/vita_blokada.htm (дата обращения: 30.12.19). [Bezzubov A.D. Vitamins for Besieged Leningrad. *Khimiya i zhizn'*, 1985, no. 1].

10. Берестов В.А., Петрова Г.Г., Изотова С.П. Использование древесной зелени в промышленном звероводстве и кролиководстве. Л.: Колос. Ленингр. отделение, 1982. 96 с. [Berestov V.A., Petrova G.G., Izotova S.P. *The Use of Woody Greens in Industrial Fur Breeding and Rabbit Breeding*. Leningrad, Kolos Publ., 1982. 96 p.].

11. Борисов А.Ю. Древесина осины как материал для устройства кровли // Уч. зап. ПетрГУ. 2014. Т. 1, № 8. С. 87–90. [Borisov A.Yu. Aspen Wood as Roof Construction Material. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University], 2014, no. 8, vol. 1, pp. 87–90].

12. Борисов А.Ю., Колесников Г.Н. Особенности заготовки древесины осины и использование отходов ее переработки на складах лесозаготовительных предприятий // Современ. проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 244–250. [Borisov A.Yu., Kolesnikov G.N. Harvesting Features of Aspen Timber and Processing of Wood Waste to the Landing Logging Companies. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 1-1, pp. 244–250].

13. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Реакция средневозрастных сосняков на рубки ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 1. С. 28–33. [Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S. Response of Middle-Aged Pineries to Cleaning Cutting. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 1, pp. 28–33]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a53/a53089e829e0519a2e7e3b20dca514b2.pdf>

14. Букварева Е., Замолодчиков Д., Грюневальд К. Экосистемные услуги ландшафтов России // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: моногр. В 5 т. / под ред. В.Г. Сычева, Л. Мюллера. М.: Всерос. НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2018. С. 57–61. [Bukvareva E., Zamolodchikov D., Gryuneval'd K. Ecosystem Services of Russian landscapes. *Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia*: Monograph. In 5 vol. Ed. by V.G. Sychev, L. Muller. Moscow, SBSI «Pryanishnikov Institute of Agrochemistry» Publ., 2018, pp. 57–61]. DOI: [10.25680/4053.2018.30.99.006](https://doi.org/10.25680/4053.2018.30.99.006)

15. Васильев С.Н., Роцин В.И., Ягодин В.И. Экстрактивные вещества древесной зелени *Pinus sylvestris* L. // Раст. ресурсы. 1995. Т. 31, вып. 2. С. 79–119. [Vasil'yev S.N., Roshchin V.I., Yagodin V.I. Extractive Substances of *Pinus sylvestris* L. Woody Greens. *Rastitelnye Resursy*, 1995, vol. 31, iss. 2, pp. 79–119].

16. Гаврилов Т.А., Евстигнеев В.Д., Зайцева М.И., Колесников Г.Н., Никонова Ю.В. Применение отходов лесопиления для очистки поверхностных стоков на объектах транспортной инфраструктуры // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2018. Т. 22. № 2. С. 87–94. [Gavrilov T.A., Evstigneev V.D., Zaytseva M.I., Kolesnikov G.N., Nikonova Yu.V. The Use of Wood Sawdust for Treatment of Surface Runoff on the Transport Infrastructure. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2018, vol. 22, no. 2, pp. 87–94]. DOI: [10.18698/2542-1468-2018-2-87-94](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-2-87-94)

17. Гаврилова О.И., Кищенко И.Т. Влияние минеральных удобрений на рост культур сосны обыкновенной на песчаных почвах южной Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 1. С. 28–33. [Gavrilova O.I., Kishchenko I.T. Influence of Mineral Fertilizers on Scots Pine Growth on South Karelia Sand Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry

Journal], 2003, no. 1, pp. 28–33]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/39c/39c4fd9e098303207e6431b88d82373b.pdf>

18. Гелес И.С., Коржова М.А. Ресурсы промежуточного пользования лесом и некоторые направления их использования // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2008. № 2. С. 10–15. [Gueles I.S., Korzhova M.A. Resources of Intermediate Forest Utilization and Some of Their Potential Uses. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2008, no. 2, pp. 10–15].

19. Гурьянов М.О., Антонов О.И. Влияние обрезки ветвей в культурах ели на форму комлевой части ствола // Изв. СПбЛТА. 2015. Вып. 210. С. 37–46. [Guryanov M.O., Antonov O.I. Influence of Pruning in Spruce Plantations on a Form of Butt Length of Trees. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2015, iss. 210, pp. 37–46].

20. Данчева А.В., Залесов С.В. Влияние рубок ухода различной интенсивности на состояние естественных сосняков // Науч. вед. Белгор. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2016. № 18(239). Вып. 36. С. 32–38. [Dancheva A.V., Zalesov S.V. The Effect of Thinning on the State of Natural Pine Forests. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Scientific bulletins of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences], 2016, no. 18(239), iss. 36, pp. 32–38].

21. Дмитроченко А.П., Пшеничный П.Д. Кормление сельскохозяйственных животных. Л.; М.: Сельхозиздат, 1961. 528 с. [Dmitrochenko A.P., Pshenichnyy P.D. *Feeding Livestock*. Leningrad, Sel'khozizdat Publ., 1961. 528 p.].

22. Евдокимов И.В. Особенности формирования надземной фитомассы в культурах сосны (На примере Архангельской области): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск: 2003. 19 с. [Evdokimov I.V. *Features of the Aboveground Phytomass Formation in Pine Plantations (Case Study of Arkhangelsk Region)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2003. 19 p.].

23. Егорова А.В. Влияние экстрактов из древесной зелени и водопроводного осадка в качестве компонента субстрата на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2019. 21 с. [Egorova A.V. *The Effect of Extracts Made of Woody Greens and Sludge as a Substrate Component on Seed Germination and Growth of Scots Pine Seedlings*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2019. 21 p.].

24. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние хвойного препарата на рост и элементный состав сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях лесного питомника. // Химия раст. сырья. 2017. № 2. С. 171–180. [Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. Effects of Application of a Conifer-Derived Chemical on the Growth and Elemental Composition of *Pinus Sylvestris* L. Seedlings in a Forest Nursery. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2017, no. 2, pp. 171–180]. DOI: [10.14258/jcprm.2017021720](https://doi.org/10.14258/jcprm.2017021720)

25. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Зайцева М.И. Способ получения водных экстрактов из листьев ивы козьей с учетом суточной динамики их биологической активности для повышения всхожести семян сосны обыкновенной // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 5. С. 394–400. [Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Zaytseva M.I. The Technique of Water Extract Preparation from Goat Willow Leaves with Allowance for Circadian Rhythm of Their Biological Activity to Stimulate Scots Pine Seed Germination. *Fiziologiya rastenij* [Russian Journal of Plant Physiology], 2019, vol. 66, no. 5, pp. 394–400]. DOI: [10.1134/S0015330319040031](https://doi.org/10.1134/S0015330319040031)

26. Жукова А.И., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Ледяева А.С. Лесное ресурсо-ведение: СПб.: СПбГЛТА, 2008. 213 с. [Zhukova A.I., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Ledyayeva A.S. *Forest Resource Management*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2008. 213 p.].

27. Журавлева Л.Н. Переработка древесной зелени хвойных с использованием сжиженных углеводородов: дис. ... канд. техн. наук: Красноярск, 2005. 145 с. [Zhuravleva L.N. *Processing of Coniferous Woody Greens Using Liquefied Hydrocarbons*: Cand. Eng. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2005. 145 p.].

28. Зайцева М.И., Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П. Использование порубочных остатков для приготовления торфяных субстратов при выращивании сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2010. № 1. С. 4–8. [Zaitseva M.I., Robonen E.V., Chernobrovkina N.P. Utilization of Logging Residues in Preparation of Peat Substrates for Closed Root Growing of Scots Pine Seedlings. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2010, no. 1, pp. 4–8].

29. Зайцева М.И., Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Колесников Г.Н. Утилизация отходов переработки хвои сосны обыкновенной // Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии: сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф. ПетрГУ (23–28 июня 2013 г.). Петрозаводск: Петропресс, 2013. С. 25–30. [Zaitseva M.I., Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Kolesnikov G.N. Recycling of Pine Needles Processing Wastes. *Wooden Low-Rise Housing Construction: Economics, Architecture and Resource-Saving Technologies: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference (June 23–28, 2013) of PetrSU*. Petrozavodsk, Petroppress Publ., 2013, pp. 25–30].

30. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Влияние прореживания и азота на сезонную динамику дыхания корней сосны и ели // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 1. С. 100–114. [Zarubina L.V., Konovalov V.N. Impact of Thinning and Nitrogen on Seasonal Dynamics of Pine and Spruce Root Respiration. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 1, pp. 100–114]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.1.100](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.1.100), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/260/zarubina.pdf>

31. Зябченко С.С., Иванчиков А.А., Козлов А.Ф., Быков Е.Н., Софронова Г.И. Древесная зелень – важная кормовая добавка. Петрозаводск: Карелия, 1984. 38 с. [Zyabchenko S.S., Ivanchikov A.A., Kozlov A.F., Bykov E.N., Sofronova G.I. *Wood Greenery is an Important Feed Supplement*. Petrozavodsk, Karelia Publ., 1984. 38 p.].

32. Иванов В.В., Борисов А.Н., Петренко А.Е. Влияние густоты древостоя на формирование кроны и рост по диаметру сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 9–16. [Ivanov V.V., Borisov A.N., Petrenko A.E. Influence of Stand Density on Crown Formation and Growth along the Diameter of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 9–16]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.3.9](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.9), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/19e/9_16.pdf

33. Ильинцев А.С., Третьяков С.В., Коптев С.В., Федотов И.В., Ершов Р.А. Текущий прирост по диаметру в насаждениях, пройденных рубками ухода прореживанием // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 6. С. 66–74. [Il'intsev A.S., Tret'yakov S.V., Koptev S.V., Fedotov I.V., Ershov R.A. The Current Radial Increment in the Forest Stands after the Improvement Thinning. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 6, pp. 66–74]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.6.66](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.6.66), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/459/ilintsev.pdf>

34. Кайбияйнен Л.К., Хари П., Сазонова Т.А., Мякеля А. Сбалансированность системы водного транспорта у сосны обыкновенной. III. Площадь проводящей ксилемы и масса хвои // Лесоведение. 1986. № 1. С. 31–37. [Kaibiyainen L.K., Khari P., Sazonova T.A., Myakelya A. Balance of Water Transport in *Pinus sylvestris* L. III. Conducted Xylem Area and Needles Amount. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1986, no. 1, pp. 31–37].

35. Касимов Д.В., Касимов В.Д. Некоторые подходы к оценке экосистемных функций (услуг) лесных насаждений в практике природопользования: моногр. М.: Мир науки, 2015. 91 с. [Kasimov D.V., Kasimov V.D. *Some Approaches to the Assessment of Ecosystem Functions (Services) of Forest Stands in Environmental Management Practice*. Moscow, Mir nauki Publ., 2015. 91 p.].

36. Клевцов Д.Н. Зональные закономерности изменения фитомассы культур сосны: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Ахангельск, 2008. [Klevtsov D.N. *Zonal Patterns of Change in the Pine Phytomass*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Akhangel'sk, 2008].

37. Колесников Г.Н., Кантышев А.В., Зайцева М.И., Гаверилов Т.А., Никонова Ю.В. Конвективная сушка осиновых заготовок малой толщины: модель и эксперименты // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2019. Т. 23, № 3. С. 87–94. [Kolesnikov G.N., Kantyshev A.V., Zaitseva M.I., Gavrilov T.A., Nikonova Yu.V. Convective Seasoning of Small Thickness Aspen Workpieces: Model and Experiments. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 3, pp. 87–94]. DOI: [10.18698/2542-1468-2019-3-87-94](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-3-87-94)

38. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Эколого-физиологические особенности хвойных на удобренных почвах: моногр. Архангельск: САФУ, 2011. 338 с. [Konovalov V.N., Zarubina L.V. *Ecological and Physiological Features of Conifers on Fertilized Soils*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011. 338 p.]

39. Коновалов В.Н., Садкова А.Н., Зарубина Л.В. Биология и рост сосны обыкновенной в северотаежных фитоценозах. Архангельск: САФУ, 2017. 175 с. [Konovalov V.N., Sadkova A.N., Zarubina L.V. *Biology and Growth of Scots Pine in Northern Taiga Phytocenoses*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 175 p.]

40. Концепция интенсивного использования и воспроизводства лесов. СПб.: СПбНИИЛХ, 2015. 20 с. [*The Framework of Intensive Use and Regeneration of Forests*. Saint Petersburg, SPbNIIKH Publ., 2015. 20 p.]

41. Короткий В.П., Великанов В.И., Богданович Н.И., Роцин В.И., Водопьянов И.Ф., Чечет И.В. Разработка новых технологий получения лекарственных форм для ветеринарной медицины на основе живицы сосновой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 5. С. 125–133. [Korotky V.P., Velikanov V.I., Bogdanovich N.I., Roshchin V.I., Vodopyanov I.F., Chechet I.V. Development of New Techniques to Produce Pine Resin-Based Drags for Veterinary Medicine. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 5, pp. 125–133]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/720/X2.pdf>

42. Лесной план Республики Карелия на 2019–2028 гг. Петрозаводск, 2018. 22 с. [*Forest Plan of the Republic of Karelia for 2019–2028*. Petrozavodsk, 2018. 22 p.]

43. Логинов А.А., Лыков И.Н., Васильева М.А. Укрупненная оценка стоимости экосистемных услуг леса // Проблемы региональной экологии. 2018. № 3. С. 120–124. [Loginov A.A., Lykov I.N., Vasilyeva M.A. The Integrated Assessment of the Value of Forest Ecosystem Services. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues], 2018, no. 3, pp. 120–124]. DOI: [10.24411/1728-323X-2018-13120](https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-13120)

44. Макаров С.В. Многоцелевое использование лесного потенциала в контексте инновационной стратегии развития российской экономики // Вестн. Финансового ун-та. 2009. № 6. С. 43–47. [Makar S.V. Multipurpose Usage of the National Forest Potential in the Context of Innovative Strategy of Russian Economic Development. *Vestnik Finansovogo universiteta*. [The Bulletin of the Financial University], 2009, no. 6, pp. 43–47].

45. Малаховец П.М. Лесные культуры: Архангельск: САФУ, 2012. 222 с. [Malahovets P.M. *Forest Crops*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2012. 222 p.]

46. Мошников С.А., Ананьев В.А., Матюшкин В.А. Особенности аккумуляции порубочных остатков в спелых сосняках средней тайги (на примере Республики Карелия) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 40–51. [Moshnikov S.A., Anan'yev V.A., Matyushkin V.A. Accumulation Features of Debris in Mature Pine Forests of Middle Taiga in the Republic of Karelia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 40–51]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.1.40](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.40), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/0fb/40_51.pdf

47. Немова В.И. Совершенствование комплексного лесопользования в России на региональном уровне // Тренды и управление. 2017. № 3. С. 33–59. [Nemova V.I. Mechanisms to Enhance Integrated Forest Management Concept of Forest Resources Use in Russia. *Trendy i upravleniye* [Trends and management], 2017, no. 3, pp. 33–59]. DOI: [10.7256/2454-0730.2017.3.24161](https://doi.org/10.7256/2454-0730.2017.3.24161)

48. Новицкая Ю.Е., Чикина П.Ф. Азотный обмен у сосны на Севере. Л.: Наука, 1980. 166 с. [Novitskaya Yu.E., Chikina P.F. *Nitrogen Exchange in Pine Trees in the North*. Leningrad, Nauka Publ., 1980. 166 p.]

49. Основы лесной биогеоценологии / под ред. В.Н. Сукачева и Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1964. 574 с. [*Fundamentals of Forest Biogeocenology*. Ed. by V.N. Sukachev, N.V. Dylis. Moscow, Nauka Publ., 1964. 574 p.].

50. Патент № 123635 Российская Федерация. Машина для измельчения древесно-кустарниковой растительности на корню: опубл. 10.01.2013 / И.Р. Шегельман, П.В. Будник, Г.Н. Колесников, М.В. Ивашнев [Shegelman I.R., Budnik P.V., Kolesnikov G.N., Ivashnev M.V. *A Machine for Grinding Standing Trees and Shrubs*. Patent RF no. RU 123635 U1, 2013].

51. Патент № 138680 Российская Федерация. Теплоизоляционная древесноволокнистая плита: опубл. 20.03.2014 / М.И. Зайцева, Е.В. Робонен, Г.Н. Колесников, Н.П. Чернобровкина, С.Б. Васильев [Zaitseva M.I., Robonen E.V., Kolesnikov G.N., Chernobrovkina N.P., Vasilev S.B. *Insulating Fiberboard*. Patent RF no. RU 138680 U1, 2014].

52. Патент № 2515015 Российская Федерация. Хвойная биологически активная добавка, обогащенная L-аргинином, для повышения продуктивных качеств курнесушек: опубл. 10.05.2014 / В.П. Короткий, Ю.Н. Прытков, С.С. Марисов, Н.И. Гибалкина, А.А. Кистина, Н.П. Чернобровкина, Е.В. Робонен [Korotkiy V.P., Prytkov Ju.N., Marisov S.S., Gibalkina N.I., Kistina A.A., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. *Coniferous Biologically Active Supplement Enriched with L-Arginine to Increase the Productivity Qualities of Laying Hens*. Patent RF no. RU 2515015 C2, 2014].

53. Патент № 2540354 Российская Федерация. Способ кормления пушных зверей: опубл. 10.02.2015 / Н.П. Чернобровкина, Е.В. Робонен, Т.Н. Макарова, А.Р. Унжаков, Н.Н. Тютюнник, Л.Б. Узенбаева, И.В. Баишникова [Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Makarova T.N., Unzhakov A.R., Tjutjunnik N.N., Uzenbaeva L.B., Baishnikova I.V. *Method of Feeding Fur-Bearing Animals*. Patent RF no. RU 2540354 C1, 2015].

54. Патент № 2623479 Российская Федерация. Способ выращивания сеянцев сосны обыкновенной: опубл. 26.06.2017 / М.И. Зайцева, С.Б. Васильев, Е.В. Робонен, П.В. Луньков, Г.Н. Колесников [Zajtseva M.I., Vasilev S.B., Robonen E.V., Lunkov P.V., Kolesnikov G.N. *Method for Growing Seedlings of Scots Pine*. Patent RF no. RU 2623479 C2, 2017].

55. Патент № 2662999 Российская Федерация. Способ получения стимулятора роста сосны обыкновенной: опубл. 31.07.2018 / А.В. Егорова, Н.П. Чернобровкина, Е.В. Робонен [Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. *Method of Obtaining Growth Stimulator for Scots Pine*. Patent RF no. RU 2662999 C1, 2018].

56. Патент № 2688483 Российская Федерация. Способ пропитки древесины: опубл. 21.05.2019 / А.В. Кантышев, А.Ю. Борисов, Г.Н. Колесников, Т.А. Гаврилов. [Kantyshev A.V., Borisov A.Yu., Kolesnikov G.N., Gavrilov T.A. *Method of Wood Impregnation*. Patent RF no. RU 2688483 C1, 2019].

57. Пеккоев А.Н., Кононов А.С. Сортообразующие пороки круглых лесоматериалов сосны и ели из подзон северной и средней тайги Карелии // *Resources and Technology*. 2018. Т. 15, № 2. С. 33–44. [Pekkoev A.N., Conanov A.S. Grade Defects of Pine and Spruce Round Wood from the Northern and Middle Taiga of Karelia. *Resources and Technology*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 33–44]. DOI: [10.15393/j2.art.2018.4121](https://doi.org/10.15393/j2.art.2018.4121)

58. Племенков В.В. Природные соединения – основной базис поиска химиотерапевтических субстанций // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы IV Всерос. конф. Барнаул, 21–23 апреля 2009 г.: в 2 кн. / под ред. Н.Г. Базарновой, В.И. Маркина. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2009. Кн. 2. С. 11–14. [Plemenkov V.V. Natural Compounds – Basic in Searching for Chemotherapeutic Substances. *Advances in Chemistry and Chemical Engineering of Bioorganic Materials: Proceedings of the 4th All-Russian Conference, Barnaul, April 21–23, 2009*. In 2 books. Ed. by N.G. Bazarnova, V.I. Markin. Barnaul, ASU Publ., 2009, book 2, pp. 11–14].

59. Речкина Е.А., Губаненко Г.А., Рубчевская Л.П. Выделение пектиновых веществ из древесной зелени сосны обыкновенной // *Химия раст. сырья*. 2010. № 4.

C. 189–190. [Rechkina E.A., Gubanenko G.A., Rubchevskaya L.P. Isolation of Pectin Substances from Woody Greens of Scots Pine. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2010, no. 4, pp. 189–190].

60. Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Макарова Т.Н., Короткий В.П., Прытков Ю.Н., Марисов С.С. Накопление L-аргинина в хвое и распределение по кроне сосны обыкновенной при регуляции азотного и борного обеспечения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 3. С. 67–78. [Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Makarova T.N., Korotky V.P., Prytkov Yu.N., Marisov S.S. Accumulation of L-Arginine in Scots Pine Needles and Its Distribution over the Crown Under Regulation of Nitrogen and Boron Supply. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 3, pp. 67–78]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ff7/lkh7.pdf>

61. Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Зайцева М.И. Источники получения древесной зелени для производства аргининового иммуностимулятора // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2012. № 3. С. 11–15. [Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Zaitseva M.I. Sources of Foliage for Arginine Immunostimulant Manufacturing. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 3, pp. 11–15].

62. Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Зайцева М.И., Унжаков А.Р., Егорова А.В. Перспективы биотехнологии обогащения древесной зелени хвойных L-аргинином и ингибиторами его катаболизма // Химия раст. сырья. 2019. № 1. С. 23–37. [Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Zaytseva M.I., Unzhakov A.R., Egorova A.V. Perspectives of Wood-Greenery Biotechnology Enrichment with L-Arginine and Inhibitors of Its Catabolism. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2019, no. 1, pp. 23–37. DOI: [10.14258/jcprm.2019014243](https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014243)

63. Сафин Р.Г., Саттарова З.Г., Хабибуллин И.Г., Зиятдинов Р.Р., Степанова Т.О. Современные направления переработки лесных ресурсов // Вестн. Казан. технол. унта. 2015. Т. 18, № 21. С. 90–93. [Safin R.G., Sattarova Z.G., Khabibullin I.G., Ziatdinov R.R., Stepanova T.O. Current Trends in Forest Resources Processing. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 21, pp. 90–93].

64. Сеннов С.Н. Влияние рубок ухода на итоговый запас древостоя // Тр. СПбНИИЛХ, 2012. № 1-2. С. 8–10. [Sennov S.N. Effect of Thinning on the Final Growing Stock of Stand. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute], 2012, no. 1-2, pp. 8–10].

65. Синькевич С.М. Влияние рубок ухода на рост сосновых насаждений // Лесоводственно-экологические аспекты хозяйственной деятельности в лесах Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 101–122. [Sin'kevich S.M. Effect of Thinning on the Growth of Pine Stands. *Silvicultural and Ecological Aspects of Economic Activities in Forests of Karelia*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2005, pp.101–122].

66. Славянский А.К., Шарков В.И., Ливеровский А.А., Бувеской А.В., Медников Ф.А., Лямин В.А., Солодкий Ф.Т., Цацка Э.М., Дмитриева О.А., Никандров Б.Ф. Химическая технология древесины. М.: Гослесбумиздат, 1962. 214 с. [Slavyanskiy A.K., Sharkov V.I., Liverovskiy A.A., Buyevskoy A.V., Mednikov F.A., Lyamin V.A., Solodkiy F.T., Tsatska E.M., Dmitriyeva O.A., Nikandrov B.F. *Chemical Technology of Wood*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 214 p.].

67. Соколов А.И., Пеккоев А.Н., Харитонов В.А. Влияние периодического внесения азотных удобрений на качество древесины сосны обыкновенной в культурах // Успехи современного естествознания. 2016. № 11. С. 75–79. [Sokolov A.I., Pekkoiev A.N., Kharitonov V.A. Effect of Regularly Repeated Applications of Nitrous Fertilizers on Timber Quality in Scots Pine Crops. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2016, no. 11, pp. 75–79].

68. Соколов А.П., Сюнев В.С. Логистический подход к обоснованию технологий и параметров процессов комплексного освоения лесосырьевых баз // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 3(35). С. 100–106. [Sokolov A.P., Syuney V.S. Logistic Approach to the Determination of Technologies and Parameters of the Forest Resources Multipurpose Use. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 3(35), pp. 100–106]. DOI: [10.18324/2077-5415-2017-3-100-106](https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-3-100-106)

69. Степанов В.И., Мезина Н.А. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестн. РЭУ. 2012. № 3. С. 83–88. [Stepanov V.I., Mezina N.A. Forest Industry Wastes and Their Use in the National Economy. *Vestnik Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], 2012, no. 3, pp. 83–88].

70. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г.: распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 г. № 1989-р. М., 1989. 102 с. [*Development Strategy of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030. Order of the Government of the Russian Federation No. 1989-p Dated September 20, 2018*. Moscow, 2018. 102 p.].

71. Судаchkova Н.Е., Милютин И.Л., Семенова Г.П. Состав и содержание свободных аминокислот в различных частях и тканях *Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb. и *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr // Раст. ресурсы. 2003. Т. 39(1). С. 19–31. [Saduchkova N.E., Milyutina I.L., Semenova G.P. Content and Composition of Free Amino Acids in Different Parts and Tissues of *Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb. and *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr. *Rastitelnye Resursy*, 2003, vol. 39(1), pp. 19–31].

72. Тебенькова Д.Н., Лукина Н.В., Чумаченко С.И., Данилова М.А., Кузнецова А.И., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Катаев А.Д., Гагарин Ю.Н. Мультифункциональность и биоразнообразие лесных экосистем // Лесоведение. 2019. № 5. С. 341–356. [Teben'kova D.N., Lukina N.V., Chumachenko S.I., Danilova M.A., Kuznetsova A.I. Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kataev A.D., Gagarin Yu.N. Multifunctionality and Biodiversity of Forest Ecosystems. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 5, pp. 341–356]. DOI: [10.1134/S0024114819050115](https://doi.org/10.1134/S0024114819050115)

73. Третьяков С.В. Динамика формирования и продуктивность смешанных сосновых древостоев средней подзоны тайги Европейского Севера России: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2011. 43 с. [Tret'yakov S.V. *Formation Dynamics and Productivity of Mixed Pine Stands in the Middle Taiga Subzone of the European North of Russia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2011. 43 p.].

74. 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]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.6.56](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.56), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/dc6/Tyukavina.pdf>

75. Унжаков А.Р., Антонова Е.П., Сергина С.Н., Башишникова И.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние обогащенного L-аргинином хвойного экстракта на биохимические показатели крови щенков-гипотрофиков норок // Кролиководство и звероводство. 2017. № 3. С. 104–105. [Unzhakov A.R., Antonova E.P., Sergina S.N., Baishnikova I.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. The Influence of Enriched L-Arginine Pine Extract on Biochemical Blood Parameters in Puppies-Hypotrophics Minks. *Krolikovodstvo i Zverovodstvo* [Rabbit and Animal Breeding], 2017, no. 3, pp. 104–105].

76. Усольцев В.А., Часовских В.П., Цепордей И.С. Вертикальная структура фитомассы деревьев сосны обыкновенной: исследование системных связей средствами информационных технологий: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 436 с. [Usol'tsev V.A., Chasovskikh V.P., Tsepordey I.S. *Phytomass Vertical Structure of Scots Pine Trees: Studying System Connections by Means of Information Technology*: Monograph. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2018. 436 p.].

77. Хуришкайнен Т.В., Скрипова Н.Н., Кучин А.В. Сравнительная оценка экстракционного оборудования для эффективного выделения экстрактивных веществ хвойной древесной зелени // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 25–30. [Hurshkainen T.V., Skripova N.N., Kutchin A.V. Comparative Assessment of Extraction Equipment for Efficient Isolation of Extractives of Coniferous Woody Greenery. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2017, no. 1, pp. 25–30]. DOI: [10.25750/1995-4301-2017-1-025-030](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2017-1-025-030)

78. Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Содержание азота, бора и аминокислот в хвое сосны обыкновенной при регуляции азотного и борного обеспечения // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 12. С. 35–44. [Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. Nitrogen, Boron and Amino Acid Levels in the Needles of Scots Pine Seedlings with Controlled Nitrogen and Boron Supply. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS], 2015, no. 12, pp. 35–44]. DOI: [10.17076/eb217](https://doi.org/10.17076/eb217)

79. Чернобровкина Н.П., Дорофеева О.С., Робонен Е.В. Аминокислотный состав хвои сеянцев сосны обыкновенной в связи с обеспеченностью бором // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2009. № 3. С. 56–61. [Chernobrovkina N.P., Dorofeeva O.S., Robonen E.V. Amino Acid Composition in Needles of Scots Pine Seedlings in Relation to Boron Availability. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2009, no. 3, pp. 56–61].

80. Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Зайцева М.И. Накопление L-аргинина в хвое сосны обыкновенной при регуляции азотного и борного обеспечения // Химия раст. сырья. 2010. № 3. С. 71–75. [Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Zaitseva M.I. Accumulation of L-Arginine in Scots Pine Needles while Regulation of Nitrogen and Boron Supply. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya* [Chemistry of plant raw material], 2010, no. 3, pp. 71–75].

81. Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Морозов А.К., Макарова Т.Н. Накопление L-аргинина в хвое ели европейской при регуляции азотного и борного обеспечения // Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 3. С. 159–165. [Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Morozov A.K., Makarova T.N. Accumulation of L-Arginine in Needles of Norway Spruce with Regulated Nitrogen and Boron Availability. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS], 2013, no. 3, pp. 159–165].

82. Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Унжаков А.Р., Тютюнник Н.Н. Аргинин в жизни хвойных растений // Сиб. экол. журн. 2016. № 5. С. 729–738. [Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Unzhakov A.R., Tyutyunnik N.N. Arginine in the Life of Coniferous Plants. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2016, no. 5, pp. 729–738]. DOI: [10.15372/SEJ20160510](https://doi.org/10.15372/SEJ20160510)

83. Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Иготти С.А., Дорофеева О.С., Шенгелия И.Д. Влияние обеспеченности бором на рост сеянцев сосны обыкновенной // Лесоведение. 2007. № 5. С. 69–76. [Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Igotti S.A., Dorofeeva O.S., Shengelia I.D. The Effect of Supply of Soils with Boron on the Growth of *Pinus sylvestris* Seedlings. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 5, pp. 69–76].

84. Ягодин В.И. Основы химии и технологии переработки древесной зелени / под ред. Ю.И. Холькина. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 224 с. [Yagodin V.I. *Fundamentals of Chemistry and Technology of Woody Greens Processing*. Leningrad, LGU Publ., 1981. 224 p.]

85. Aussenac G. Interactions between Forest Stands and Microclimate: Ecophysiological Aspects and Consequences for Silviculture. *Annals of Forest Science*, 2000, vol. 57, no. 3, pp. 287–301. DOI: [10.1051/forest:2000119](https://doi.org/10.1051/forest:2000119)

86. Axel R. Wirtschaftlichkeit der Wertastung. *Allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umwelt Sorge*, 1989, Bd. 44–45, S. 1188–1190.

87. Bergh J., Nilsson U., Allen H.L., Johansson U., Fahlvik N. Long-Term Responses of Scots Pine and Norway Spruce Stands in Sweden to Repeated Fertilization and Thinning. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 320, pp. 118–128. DOI: [10.1016/j.foreco.2014.02.016](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.016)

88. Binkley D., Högberg P. Tamm Review: Revisiting the Influence of Nitrogen Deposition on Swedish Forests. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 368, pp. 222–239. DOI: [10.1016/j.foreco.2016.02.035](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.035)

89. Bledzki A.K., Gassan J. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. *Progress in Polymer Science*, 1999, vol. 24, iss. 2, pp. 221–274. DOI: [10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)
90. Brockley R.P. Effects of Nitrogen and Boron Fertilization on Foliar Boron Nutrition and Growth in Two Different Lodgepole Pine Ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 6, pp. 988–996. DOI: [10.1139/x03-032](https://doi.org/10.1139/x03-032)
91. Crecente-Campo F., Pommerening A., Rodríguez-Soalleiro R. Impacts of Thinning on Structure, Growth and Risk of Crown Fire in a *Pinus sylvestris* L. Plantation in Northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 257, iss. 9, pp. 1945–1954. DOI: [10.1016/j.foreco.2009.02.009](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.009)
92. De Vries W. Effects on Trees: Stem Growth. *The Condition of Forests in Europe: 2013 Executive Report*. Thünen, ICP Forests, 2013, pp. 30–32.
93. Del Río M., Bravo-Oviedo A., Pretzsch H., Löf M., Ruiz-Peinado R. A Review of Thinning Effects on Scots Pine Stands: From Growth and Yield to New Challenges under Global Change. *Forest Systems*, 2017, vol. 26, no. 2, art. eR03S. DOI: [10.5424/fs/2017262-11325](https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11325)
94. Del Río M., Calama R., Cañellas L., Roig S., Montero G. Thinning Intensity and Growth Response in SW-European Scots Pine Stands. *Annals of Forest Science*, 2008, vol. 65, iss. 3, art. 308. DOI: [10.1051/forest:2008009](https://doi.org/10.1051/forest:2008009)
95. Durzan D.J. Arginine, Scurvy and Cartier’s “Tree of Life”. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2009, no. 5, art. 5. DOI: [10.1186/1746-4269-5-5](https://doi.org/10.1186/1746-4269-5-5)
96. Durzan D.J. Arginine and the Shade Tolerance of White Spruce Saplings. Entering Winter Dormancy. *Journal of Forest Science*, 2010, vol. 56, no. 2, pp. 77–83. DOI: [10.17221/57/2009-JFS](https://doi.org/10.17221/57/2009-JFS)
97. Durzan D.J. Interpolated Apomictic Somatic Embryogenesis, Androsporogenesis, Asexual Heterospory, Mitosporogenesis and Genomic Silencing in a Gymnosperm Artificial Sporangium. *Proceedings of the IUFRO Working Party 2.09.02 Conference on “Integrating Vegetative Propagation, Biotechnologies and Genetic Improvement for Tree Production and Sustainable Forest Management”, Brno, Czech Republic, June 25–28, 2012*. Brno, IUFRO, 2012, pp. 3–36.
98. Ellsworth D.S., Crous K.Y., Lambers H., Cooke J. Phosphorus Recycling in Photorespiration Maintains High Photosynthetic Capacity in Woody Species. *Plant, Cell & Environment*, 2015, vol. 38, iss. 6, pp. 1142–1156. DOI: [10.1111/pce.12468](https://doi.org/10.1111/pce.12468)
99. Eriksson H., Karlsson K. *Effects of Different Thinning and Fertilization Regimes on the Development of Scots Pine (Pinus sylvestris (L.)) and Norway Spruce (Picea abies (L.) Karst.) Stands in Long-Term Silvicultural Trials in Sweden*. Technical Report no. SLU-SKOPRO-R-42. Uppsala, SLU, 1997, vol. 42. 135 p. [In Swedish].
100. From F. *Long-Term Effects of Nitrogen (N) Fertilizer and Simulated N Deposition on Boreal Forest Growth*. Licentiate Thesis. Umeå, SLU, 2014. 49 p.
101. From F., Strengbom J., Nordin A. Residual Long-Term Effects of Forest Fertilization on Tree Growth and Nitrogen Turnover in Boreal Forest. *Forests*, 2015, vol. 6, iss. 4, pp. 1145–1156. DOI: [10.3390/f6041145](https://doi.org/10.3390/f6041145)
102. Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy Wood Resources in Northwest Russia. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35, iss. 5, pp. 1655–1662. DOI: [10.1016/j.biombioe.2010.12.039](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.039)
103. Gezelius K., Näsholm T. Free Amino Acids and Protein in Scots Pine Seedlings Cultivated at Different Nutrient Availabilities. *Tree Physiology*, 1993, vol. 13, iss. 1, pp. 71–86. DOI: [10.1093/treephys/13.1.71](https://doi.org/10.1093/treephys/13.1.71)
104. Ghosh M.K., Ghosh U.K. Utilization of Pine Needles as Bed Material in Solid State Fermentation for Production of Lactic Acid by Lactobacillus Strains. *Bio-Resources*, 2011, vol. 6, iss. 2, pp. 1556–1575.
105. Gupta M., Chauhan M., Khatoon N., Singh B. Studies on Biocomposites Based on Pine Needles and Isocyanate Adhesives. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 352–362. DOI: [10.1166/jbmb.2010.1100](https://doi.org/10.1166/jbmb.2010.1100)

106. Haveraaen O., Frivold L.H. Effect of Repeated Fertilization on Stem Growth in Old Stands of *Pinus sylvestris* in South East Norway. *Journal of Forest Science*, 2015, vol. 61, no. 2, pp. 72–79. DOI: [10.17221/110/2014-JFS](https://doi.org/10.17221/110/2014-JFS)

107. Hopmans P., Flinn D.W. Boron Deficiency in *Pinus radiata* D. Don and the of Applied Boron on Height Growth and Nutrient Uptake. *Plant and Soil*, 1984, vol. 79, iss. 2, pp. 295–298. DOI: [10.1007/BF02182353](https://doi.org/10.1007/BF02182353)

108. Högborg P., Fan H., Quist M., Binkley D., Tamm C.O. Tree Growth and Acidification in Response to 30 Years of Experimental Nitrogen Loading on Boreal Forest. *Global Change Biology*, 2006, vol. 12, iss. 3, pp. 489–499. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2006.01102.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01102.x)

109. Huhn G., Schulz H. Contents of Free Amino Acids in Scots Pine Needles from Field Sites with Different Levels of Nitrogen Deposition. *New Phytologist*, 1996, vol. 134, iss.1, pp. 95–101. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1996.tb01149.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01149.x)

110. Hyvönen R., Persson T., Andersson S., Olsson B., Ågren G.I., Linder S. Impact of Long-Term Nitrogen Addition on Carbon Stocks in Trees and Soils in Northern Europe. *Biogeochemistry*, 2008, vol. 89, pp. 121–137. DOI: [10.1007/s10533-007-9121-3](https://doi.org/10.1007/s10533-007-9121-3)

111. Ikonen V.-P., Peltola H., Wilhelmsson L., Kilpeläinen A., Väisänen H., Nuutinen T., Kellomäki S. Modelling the Distribution of Wood Properties along the Stems of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) as Affected by Silvicultural Management. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 256, no. 6, pp. 1356–1371. DOI: [10.1016/j.foreco.2008.06.039](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.039)

112. Iwalokun B.A., Hodonu S.A., Nwoke S., Ojo O., Agomo P.U. Evaluation of the Possible Mechanisms of Antihypertensive Activity of Loran Thus *Micranthus*: An African Mistletoe. *Biochemistry Research International*, 2011, vol. 2011, art. 159439. DOI: [10.1155/2011/159439](https://doi.org/10.1155/2011/159439)

113. Jacobson S., Pettersson F. Growth Responses Following Nitrogen and NPKMg Additions to Previously N-Fertilized Scots Pine and Norway Spruce Stands on Mineral Soils in Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 31(5), pp. 899–909. DOI: [10.1139/x01-020](https://doi.org/10.1139/x01-020)

114. Jacobson S., Pettersson F. An Assessment of Different Fertilization Regimes in Three Boreal Coniferous Stands. *Silva Fennica*, 2010, vol. 44, no. 5, pp. 815–827. DOI: [10.14214/sf.123](https://doi.org/10.14214/sf.123)

115. Jagodziński A.M., Kałucka I., Horodecki P., Oleksyn J. Aboveground Biomass Allocation and Accumulation in a Chronosequence of Young *Pinus sylvestris* Stands Growing on a Lignite Mine Spoil Heap. *Dendrobiology*, 2014, vol. 72, pp. 139–150. DOI: [10.12657/denbio.072.012](https://doi.org/10.12657/denbio.072.012)

116. Jelonek T., Pazdrowski W., Walkowiak R., Arasimowicz-Jelonek M., Tomczak A. Allometric Models of Foliage Biomass in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, 2011, vol. 20, no. 2, pp. 355–364.

117. King J.E., Gifford D.J. Amino Acid Utilization in Seeds of Loblolly Pine during Germination and Early Seedling Growth (I. Arginine and Arginase Activity). *Plant Physiology*, 1997, vol. 113, pp. 1125–1135. DOI: [10.1104/pp.113.4.1125](https://doi.org/10.1104/pp.113.4.1125)

118. Kukkola M., Saramäki J. Growth Response in Repeatedly Fertilized Pine and Spruce Stands on Mineral Soils. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 1983, vol. 114. 55 p.

119. Kumar R., Zhang L. Aligned Ramie Fiber Reinforced Arylated Soy Protein Composites with Improved Properties. *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, iss. 5, pp. 555–560. DOI: [10.1016/j.compscitech.2008.10.027](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.027)

120. Lal P.S., Sharma A., Bist V. Pine Needle – An Evaluation of Pulp and Paper Making Potential. *Journal of Forest Products and Industries*, 2013, vol. 2, iss. 3, pp. 42–47.

121. Larson P.R., Kretschmann D.E., Clark III A., Isebrands J.G. *Formation and Properties of Juvenile Wood in Southern Pines: A Synopsis*. General Technical Report FPL-GTR-129. Madison, WI, USDA, 2001. 42 p.

122. Lehtonen A. Estimating Foliage Biomass in Scots Pine (*Pinus sylvestris*) and Norway Spruce (*Picea abies*) Plots. *Tree Physiology*, 2005, vol. 25, iss. 7, pp. 803–811. DOI: [10.1093/treephys/25.7.803](https://doi.org/10.1093/treephys/25.7.803)
123. Lindström H. Basic Density in Norway Spruce. Part I. A Literature Review. *Wood and Fiber Science*, 1996, vol. 28(1), pp. 15–27.
124. Magill A.H., Aber J.D., Currie W.S., Nadelhoffer K.J., Martin M.E., McDowell W.H., Melillo J.M., Steudler P. Ecosystem Response to 15 Years of Chronic Nitrogen Additions at the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 196, iss. 1, pp. 7–28. DOI: [10.1016/j.foreco.2004.03.033](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.033)
125. Mäkelä A., Vanninen P. Impacts of Size and Competition on Tree Form and Distribution of Aboveground Biomass in Scots Pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, vol. 28, no. 2, pp. 216–227. DOI: [10.1139/x97-199](https://doi.org/10.1139/x97-199)
126. Mäkinen H., Hynynen J. Wood Density and Tracheid Properties of Scots Pine: Responses to Repeated Fertilization and Timing of the First Commercial Thinning. *Forestry*, 2014, vol. 87, iss. 3, pp. 437–447. DOI: [10.1093/forestry/cpu004](https://doi.org/10.1093/forestry/cpu004)
127. Mäkinen H., Saranpää P., Linder S. Wood-Density Variation of Norway Spruce in Relation to Nutrient Optimization and Fibre Dimensions. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 32, no. 2, pp. 185–194. DOI: [10.1139/x01-186](https://doi.org/10.1139/x01-186)
128. Mälkönen E., Kukkola M. Effects of Long-Term Fertilization on the Biomass Production and Nutrient Status of Scots Pine Stands. *Fertilizer Research*, 1991, vol. 27, pp. 113–127. DOI: [10.1007/BF01048614](https://doi.org/10.1007/BF01048614)
129. Mead D.J., Gadgil R.L. Fertilizer Use in Established Radiata Pine Stands in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1978, vol. 8, no. 1, pp. 105–134.
130. Mörling T. Evaluation of Annual Ring Width and Ring Density Development Following Fertilization and Thinning of Scots Pine. *Annals of Forest Science*, 2002, vol. 59, no. 1, pp. 29–40. DOI: [10.1051/forest:2001003](https://doi.org/10.1051/forest:2001003)
131. Mörling T., Valinger E. Effects of Fertilization and Thinning on Heartwood Area, Sapwood Area and Growth in Scots Pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 5, pp. 462–469. DOI: [10.1080/02827589950154168](https://doi.org/10.1080/02827589950154168)
132. Müssig J. Cotton Fibre-Reinforced Thermosets Versus Ramie Composites: A Comparative Study Using Petrochemical- and Agro-Based Resins. *Journal of Polymers and the Environment*, 2008, vol. 16, pp. 94–102. DOI: [10.1007/s10924-008-0089-4](https://doi.org/10.1007/s10924-008-0089-4)
133. Näsholm T., Ericsson A. Seasonal Changes in Amino Acids, Protein and Total Nitrogen in Needles of Fertilized Scots Pine Trees. *Tree Physiology*, 1990, vol. 6, iss. 3, pp. 267–281. DOI: [10.1093/treephys/6.3.267](https://doi.org/10.1093/treephys/6.3.267)
134. Niemistö P., Kilpeläinen H., Poutiainen E. Effect of First Thinning Type and Age on Growth, Stem Quality and Financial Performance of a Scots Pine Stand in Finland. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 2, art. 7816. DOI: [10.14214/sf.7816](https://doi.org/10.14214/sf.7816)
135. Nilsen P., Abrahamsen G. Scots Pine and Norway Spruce Stands Responses to Annual N, P and Mg Fertilization. *Forest Ecology and Management*, 2003, vol. 174, iss. 1-3, pp. 221–232. DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00024-5)
136. Nordin A., Ugglä C., Näsholm T. Nitrogen Forms in Bark, Wood and Foliage of Nitrogen-Fertilized *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 2001, vol. 21, iss. 1, pp. 59–64. DOI: [10.1093/treephys/21.1.59](https://doi.org/10.1093/treephys/21.1.59)
137. Novak J., Slodicak M., Dusek D. Thinning Effects on Forest Productivity and Site Characteristics in Stands of *Pinus sylvestris* in the Czech Republic. *Forest Systems*, 2011, vol. 20, no. 3, pp. 464–474. DOI: [10.5424/fs/20112003-11074](https://doi.org/10.5424/fs/20112003-11074)
138. Oleksyn J., Reich P.B., Zytkowski R., Karolewski P., Tjoelker M.G. Needle Nutrients in Geographically Diverse *Pinus sylvestris* L. Populations. *Annals of Forest Science*, 2002, vol. 59, no. 1, pp. 1–18. DOI: [10.1051/forest:2001001](https://doi.org/10.1051/forest:2001001)
139. Peltola H., Kilpeläinen A., Sauvala K., Räisänen T., Ikonen, V.-P. Effects of Early Thinning Regime and Tree Status on the Radial Growth and Wood Density of Scots Pine. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41, no. 3, pp. 489–505. DOI: [10.14214/sf.285](https://doi.org/10.14214/sf.285)

140. Pettersson F., Högbom L. Long-Term Growth Effects Following Forest Nitrogen Fertilization in *Pinus sylvestris* and *Picea abies* Stands in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 19, iss. 4, pp. 339–347. DOI: [10.1080/02827580410030136](https://doi.org/10.1080/02827580410030136)
141. Pietrzykowski M., Socha J. An Estimation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Ecosystem Productivity on Reclaimed Post-Mining Sites in Poland (Central Europe) Using of Allometric Equations. *Ecological Engineering*, 2011, vol. 37, iss. 2, pp. 381–386. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2010.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.006)
142. Poorter H., Niklas K.J., Reich P.B., Oleksyn J., Poot P., Mommer L. Biomass Allocation to Leaves, Stems and Roots: Meta-Analyses of Interspecific Variation and Environmental Control. *New Phytologist*, 2012, vol. 193, pp. 30–50. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x)
143. Primicia I., Artázcoz R., Imbert J.-B., Puertas F., Traver M.C., Castillo F.-J. Influence of Thinning Intensity and Canopy Type on Scots Pine Stand and Growth Dynamic in a Mixed Managed Forest. *Forest Systems*, 2016, vol. 25, no. 2, art. e057. DOI: [10.5424/fs/2016252-07317](https://doi.org/10.5424/fs/2016252-07317)
144. Pukkala T. Optimal Nitrogen Fertilization of Boreal Conifer Forest. *Forest Ecosystems*, 2017, vol. 4, art. 3. DOI: [10.1186/S40663-017-0090-2](https://doi.org/10.1186/S40663-017-0090-2)
145. Repola J., Ahnlund Ulvcróna K. Modelling Biomass of Young and Dense Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Dominated Mixed Forests in Northern Sweden. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 5, art. 1190. DOI: [10.14214/sf.1190](https://doi.org/10.14214/sf.1190)
146. Routa J., Kellomäki S., Peltola H., Asikainen A. Impacts of Thinning and Fertilization on Timber and Energy Wood Production in Norway Spruce and Scots Pine: Scenario Analyses Based on Ecosystem Model Simulations. *Forestry*, 2011, vol. 84, iss. 2, pp. 159–175. DOI: [10.1093/forestry/cpr003](https://doi.org/10.1093/forestry/cpr003)
147. Sauter U.H., Mutz R., Munro B.D. Determining Juvenile-Mature Wood Transition in Scots Pine Using Latewood Density. *Wood Fiber and Science*, 1999, vol. 31, pp. 416–425.
148. Sikström U. Effects of Low-Dose Liming and Nitrogen Fertilization on Stemwood Growth and Needle Properties of *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 95, iss. 3, pp. 261–274. DOI: [10.1016/S0378-1127\(97\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00025-X)
149. Singha A.S., Jyoti A. Mechanical, Morphological, and Thermal Properties of Chemically Treated Pine Needles Reinforced Thermosetting Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, vol. 127, iss. 1, pp. 387–393. DOI: [10.1002/app.37636](https://doi.org/10.1002/app.37636)
150. Sinha P., Mathur S., Sharma P., Kumar V. Potential of Pine Needles for PLA-Based Composites. *Polymer Composites*, 2018, vol. 39, iss. 4, pp. 1339–1349. DOI: [10.1002/pc.24074](https://doi.org/10.1002/pc.24074)
151. Sjølie H.K., Sørli H.A.K., Tveite B., Solberg B. The Performance of Two Swedish N Fertilization Functions Evaluated on Data from Norwegian Fertilization Experiments. *Silva Fennica*, 2015, vol. 49, no. 4, art. 1330. DOI: [10.14214/sf.1330](https://doi.org/10.14214/sf.1330)
152. Tamm C.O. *Nitrogen in Terrestrial Ecosystems*. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 1991. 116 p. DOI: [10.1007/978-3-642-75168-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75168-4)
153. Tarvainen L., Lutz M., Rantfors M., Näsholm T., Wallin G. Increased Needle Nitrogen Contents Did Not Improve Shoot Photosynthetic Performance of Mature Nitrogen-Poor Scots Pine Trees. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, art. 1061. DOI: [10.3389/fpls.2016.01051](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01051)
154. Ulvcróna T., Ulvcróna K.A. The Effects of Pre-Commercial Thinning and Fertilization on Characteristics of Juvenile Clearwood of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forestry*, 2011, vol. 84, iss. 3, pp. 207–219. DOI: [10.1093/forestry/cpr007](https://doi.org/10.1093/forestry/cpr007)
155. Valinger E. Effects of Thinning and Nitrogen Fertilization on Stem Growth and Stem Form of *Pinus sylvestris* Trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1992, vol. 7, iss. 1-4, pp. 219–228.
156. Valinger E., Elfving B., Mörling T. Twelve-Year Growth Response of Scots Pine to Thinning and Nitrogen Fertilization. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 134, iss. 1-3, pp. 45–53. DOI: [10.1016/S0378-1127\(99\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00244-3)
157. Valinger E., Sjögren H., Nord G., Cedergren J. Effects on Stem Growth of Scots Pine 33 Years after Thinning and/or Fertilization in Northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, iss. 1, pp. 33–38. DOI: [10.1080/02827581.2018.1545920](https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1545920)

158. Vanninen P. Allocation of Above-Ground Growth in *Pinus sylvestris* – Impacts of Tree Size and Competition. *Silva Fennica*, 2004, vol. 38, no. 2, pp. 155–166. DOI: [10.14214/sf.425](https://doi.org/10.14214/sf.425)
159. Varmola M., Salminen H., Timonen M. Thinning Response and Growth Trends of Seeded Scots Pine Stands at the Arctic Timberline. *Silva Fennica*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 71–83. DOI: [10.14214/sf.436](https://doi.org/10.14214/sf.436)
160. Vose J.M., Dougherty P.M., Long J.N., Smith F.W., Gholz H.L., Curran P.J. Factors Influencing the Amount and Distribution of Leaf Area of Pine Stands. *Ecological Bulletins*, 1994, no. 43, pp. 102–114. DOI: [10.2307/20113135](https://doi.org/10.2307/20113135)
161. Warren C.R., Adams M.A. Phosphorus Affects Growth and Partitioning of Nitrogen to Rubisco in *Pinus pinaster*. *Tree Physiology*, 2002, vol. 22, iss. 1, pp. 11–19. DOI: [10.1093/treephys/22.1.11](https://doi.org/10.1093/treephys/22.1.11)
162. Wikner B. Distribution and Mobility of Boron in Forest Ecosystems. *Communications Instituti Forestalis Fenniae*, 1983, no. 116, pp. 131–141.
163. Winter G., Todd C.D., Trovato M., Forlani G., Funck D. Physiological Implications of Arginine Metabolism in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, art. 534. DOI: [10.3389/fpls.2015.00534](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00534)
164. Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. *Silva Fennica Monographs 4*, 2005, vol. 4. 63 p.

OBTAINING WOODY GREENS ENRICHED WITH L-ARGININE DURING FORESTRY MANAGEMENT OF YOUNG SCOTS PINE STANDS (SCIENTIFIC REVIEW)

E.V. Robonen¹, *Research Scientist; ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0001-7926-8672)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

N.P. Chernobrovkina¹, *Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

M.I. Zaitseva², *Candidate of Engineering; ResearcherID: [P-2238-2015](https://orcid.org/0000-0003-4209-2815)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-2815>

B.V. Raevsky¹, *Doctor of Agriculture; ResearcherID: [K-6424-2018](https://orcid.org/0000-0002-1315-8937)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-8937>

A.V. Egorova¹, *Junior Research Scientist; ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

G.N. Kolesnikov², *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-1553-2014](https://orcid.org/0000-0001-9694-0264)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

¹Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: er51@bk.ru, chernobr@krc.karelia.ru, egorova.anast@mail.ru

²Petrozavodsk State University, ul. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: 2003bk@bk.ru, kolesnikovgn@yandex.ru

Forests produce a huge amount of organic matter, which is a source of renewable raw materials for the production of technical, feed, food and pharmaceutical products. The logging and woodworking industry in Karelia, as in Russia as a whole, is based exclusively on stem wood. Woody greens are formed while felling ripe and over-mature stands, thinning and implementation of measures for the conservation, protection and reproduction of forests including forest stands cutting. The development of technologies for the use of woody greens is necessary for the multi-purpose utilization of the entire phytomass produced by forest plant communities. An additional economic incentive for young stands thinning and limbing, that are used to improve the quality of logs, is the ability to reduce costs or even ensure the profitability of these measures driven by the development of processing plants and the use of wastes generated during transportation: thinners, low-quality and low-value

deciduous wood, woody greens, that are raw materials for the production of biologically active preparations of various action. The urgent tasks are to increase the use of import-substituting pharmaceutical substances and to search the alternative methods for producing raw materials for nutrient mixtures and feed stuff. Technologies for modifying the biochemical composition of coniferous greens, resulting in production of plant raw materials enriched with target biologically active substances, are being developed for the exploration of new plant sources. The water-soluble fraction of coniferous greens contains free amino acids, in particular L-arginine, which plays an important role in the life of animals. A promising way is to increase the free amino acids content in coniferous raw materials and change their quantitative ratio by regulation of the mineral nutrition regime of woody plants. An original scheme of additional supply of coniferous plants with nitrogen and boron is proposed in order to obtain coniferous greens enriched with L-arginine. The use of conifers as bioproducers of L-arginine and the study of its metabolism with reference to climatic factors, conditions of mineral nutrition, seasonal and daily dynamics in the natural environment, the search for ways to increase its level in organs and tissues is of current interest both on the theoretical and practical sides. Obtaining coniferous greens enriched with L-arginine will allow organizing the production of coniferous products for nutrient and pharmaceutical use. It is necessary to analyze the potential sources of raw materials taking into account their availability, costs for enriching the needles with L-arginine and product yield per unit area to assess the economic feasibility of organizing such production. A developed sequence of forestry measures will make it possible to obtain needles enriched with L-arginine, both in the process of implementing various types of forest use, and in carrying out activities aimed at increasing the productivity of forests and preserving their useful functions. Herewith, it is possible to turn costly cleaning and fertilizing of young Scots pine stands into profitable ones with additional products. Technologies of intentional changes in the chemical composition and pharmacological properties of plant raw materials obtained from woody plants will allow the development of new raw materials for biologically active substances.

For citation: Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Zaitseva M.I., Raevsky B.V., Egorova A.V., Kolesnikov G.N. Obtaining Woody Greens Enriched with L-Arginine during Forestry Management of Young Scots Pine Stands (Scientific Review). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 9–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-9-37

Funding: The research was federally funded for the fulfillment of the state assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Institute of KarRC RAS) and within the framework of the Development Program of the Flagship University – Petrozavodsk State University.

Keywords: forest crops, thinning, nitrogen, boron, fertilizers, Scots pine, woody greens, L-arginine, efficient use of resources.

Поступила 30.12.19 / Received on December 30, 2019

УДК 631.532

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-38-50

ВВЕДЕНИЕ *Euscammia ulmoides* Oliv. В КУЛЬТУРУ *IN VITRO***А.В. Жигунов, д-р с.-х. наук, проф.;** *ResearcherID:* [AAK-8124-2020](https://orcid.org/0000-0001-8707-7526);*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8707-7526>**Куинь Чанг Нгуен, аспирант;** *ResearcherID:* [AAK-8702-2020](https://orcid.org/0000-0003-2749-2087);*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-2749-2087>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: a.zhigunov@bk.ru

Возрастающая потребность в лекарственных средствах растительного происхождения требует изучения не только биологических ресурсов лекарственных растений, но и способов их размножения. Особенно ценны лекарственные растения, имеющие длительную историю успешного применения в традиционной медицине. К ним относится эвкоммия вязолистная (*Euscammia ulmoides* Oliv.), которая является редким реликтовым видом, произрастающим в естественных условиях в подлеске влажных субтропических лесов Китая, преимущественно в среднем течении р. Янцзы. Она выгодно отличается от большинства субтропических растений тем, что обладает значительной морозоустойчивостью и позволяет культивировать ее за пределами влажных субтропиков. С середины XX в. она широко интродуцировалась в Краснодарском крае и Республике Адыгея, успешно адаптировалась в разных экологических условиях Северо-Западного Кавказа. Для удовлетворения все возрастающего спроса на кору эвкоммии требуется закладка промышленных плантаций. Однако возникающие при ее семенном размножении трудности (двудомность вида, низкое качество пыльцы, партенокарпия, длительный покой семян, нерегулярность плодоношения, длительный ювенильный период) заставляют обращаться к современным биотехнологическим методам размножения растений. Рассматривая вопросы выращивания посадочного материала, следует сосредоточить внимание на высокоэффективных методах, обеспечивающих стабильное и массовое размножение изучаемых объектов. При этом важную роль играет разработанный и выбранный для конкретных целей путь регенерации растений *in vitro*. Эффективность использования методов биотехнологии связана с сокращением сроков получения в большом количестве вегетативного потомства трудно размножаемых растений, а также с экономией площадей, необходимых для их культивирования. По результатам проведенных исследований подобраны условия получения асептической культуры *E. ulmoides*. Наивысшая степень стерилизации сегментов побегов эвкоммии вязолистной оказалась при последовательном погружении образцов сначала в 70 %-й этанол (30 с), а затем в 0,1 %-й раствор HgCl₂ (5 мин). При такой процедуре стерилизации 63,3 % исследуемых черенков оказываются стерильными, из них 56,7 % – жизнеспособными. Определен оптимальный состав питательной среды для регенерации микропобегов *E. ulmoides*: среда Мурасиге–Скуга (MS) с дополнением 1 мг/л бензиламинопурина (БАП) + 0,2 мг/л альфа-нафтилуксусной кислоты (НУК). Лучшими питательными средами для укоренения эксплантов являются следующие: 2/3 MS + 1,5 мг/л НУК + 30 г сахарозы + 7 г агара; 2/3 MS + 1 мг/л НУК + 0,4 мг/л ИМК + 30 г сахарозы + 7 г агара.

Для цитирования: Жигунов А.В., Нгуен Куинь Чанг. Введение *Euscammia ulmoides* Oliv. в культуру *in vitro* // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 38–50. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-38-50

Ключевые слова: *Euscammia ulmoides* Oliv., микрклональное размножение, микропобег, стерилизация, регенерация, регулятор роста.

Введение

Возрастающая потребность в лекарственных средствах растительного происхождения и интерес к ним научной и народной медицины требуют серьезного изучения биологических ресурсов, в том числе перспективных лекарственных растений. Среди лекарственных средств препараты из растительного сырья составляют в настоящее время более 40 %, а среди используемых при лечении сердечно-сосудистых заболеваний, болезней печени, желудочно-кишечного тракта, нервной системы их доля – около 80 %. Особенно ценны лекарственные растения, имеющие длительную историю успешного применения в традиционной медицине.

Одним из таких растений, известных в китайской медицине свыше 1000 лет, является эвкоммия вязолистная (*Eucommia ulmoides* Oliv.) – двудомное листопадное дерево, вид монотипного семейства *Eucommiaceae* (Эвкоммиевые), входящего в порядок *Garryales* (Гарриецветные). Его отдельные экземпляры могут достигать 20 м в высоту. *E. ulmoides* является представителем редкого реликтового вида, родина которого Китай [9]. В настоящее время *E. ulmoides* выращивается более чем в 10 странах Европы, Америки и Азии [10, 13, 14]. Галеновые препараты, получаемые из коры этого растения, обладают сильным гипотензивным действием, относятся к группе спазмолитических лекарственных средств, не вызывают побочных явлений и малотоксичны. Действие препаратов связано с наличием в их составе хлорогеновой и кофейной кислот и гликозида аукубина. Хлорогеновая кислота улучшает обмен веществ, а аукубин оказывает мочегонное действие, тем самым способствуя снижению артериального давления. Кроме того, они обладают также тонизирующими свойствами, придают человеку бодрость, восстанавливают силы. Современная медицина с успехом применяет настой из коры этого дерева для укрепления нервной системы и лечения гипертонии. Ежегодная заготовка коры эвкоммии для лекарственных целей только в Китае составляет более 100...120 т. Почти вся она вывозится в страны Европы [11, 20].

Во Вьетнаме *E. ulmoides* была интродуцирована в 1958–1960 гг. Пробная посадка в г. Сапе провинции Лаокай дала хорошие результаты, что позволило ее размножить и посадить в других районах Вьетнама (Винь-Фу, Лай-Чау, Тхань Хоа, Гиа Лай, Лам Донг). В 2013 г. правительство Вьетнама утвердило «Генеральный план развития фармацевтической промышленности до 2020 года и ориентировочно до 2030 года» [18]. Согласно этому плану, эвкоммия вязолистная является одним из 36 видов ценных лекарственных растений, выращивание которых требуется для развития фармацевтической промышленности и медицины Вьетнама.

E. ulmoides выгодно отличается от большинства субтропических растений тем, что обладает морозоустойчивостью. На территории царской России в открытом грунте она впервые введена в культуру на Украине (Устимовский парк, около Кременчуга) и на Северном Кавказе (Майкоп). В этих условиях 2-летние саженцы выдерживали понижение температуры до $-33,8$ °C [3]. Положительные результаты по интродукции позволили культивировать ее за пределами влажных субтропиков. С середины XX в. она широко интродуцировалась в Краснодарском крае и Республике Адыгея и успешно адаптировалась в разных экологических условиях Северо-Западного Кавказа [10].

Экономическая, экологическая и социальная значимость размножения этой культуры чрезвычайно высока, так как создание плантаций и высокотехнологичных производств для получения посадочного материала предполагает новые рабочие места для местного населения. Возникающие трудности при традиционном семенном размножении эвкоммии вязолистной (двудомность вида, низкое качество пыльцы, партенокарпия, длительный покой семян, нерегулярность плодоношения, длительный ювенильный период) заставляют обращаться к современным биотехнологическим методам. Вегетативно ее разводят зелеными черенками или отводками. Рассматривая проблемы выращивания посадочного материала, следует сосредоточиться на высокоэффективных методах, обеспечивающих стабильное и массовое получение *E. ulmoides*. Важная роль принадлежит разработанной для конкретных целей регенерации растений *in vitro*. Эффективность использования методов биотехнологии связана с уменьшением сроков получения необходимого количества растений за счет высокого коэффициента размножения в культуре *in vitro*, а также с сокращением используемых площадей под коллекциями. Решение задачи расширения источников лекарственного растительного сырья путем выращивания культуры клеток и тканей на искусственных питательных средах является очень важным направлением исследований [4, 12, 15, 16, 19].

Формирование почек *in vitro* может происходить либо из первичного экспланта (прямая регенерация), либо из каллуса (побегообразование). В обоих случаях формируется большое количество регенератов, отличительной особенностью которых является отсутствие корней. Для получения полноценных растений необходим этап укоренения [6]. Один из определяющих факторов, индуцирующих эвокацию и дифференциацию тканей и морфогенез органов растений, – ауксин, однако в ряде случаев степень влияния и качественный характер дифференциации зависит от его взаимодействия с другими веществами, в частности с цитокининами [1, 5–7]. Высокое отношение концентрации ауксинов к цитокининам вызывает ризогенез, а низкое способствует появлению почек. Однако каждый вид растений (отдельный генотип) требует самостоятельного подбора соотношения фитогормонов для индукции морфогенеза. Поэтому в настоящее время подбор экзогенного баланса фитогормонов цитокининового и ауксинового рядов является единственно доступным способом индукции и регуляции морфогенеза [17].

Выделенные кусочки ткани или отдельные клетки растений помещают на искусственную питательную среду. Если растительную клетку изолировать, то в стерильных условиях на соответствующей питательной среде она снова начинает делиться, из нее может развиваться целый растительный организм. Процесс вторичной дифференцировки можно разделить на две фазы. Первая фаза – образование в массе однородных клеток очагов регенерационной меристемы и возникновение зародышевых структур (эмбриоидов), которые напоминают настоящие и имеют зачаточную почечку и зачаточный корешок. На второй фазе происходит рост этих зародышевых структур. При этом в зависимости от соотношения фитогормонов (ауксинов и цитокининов) наблюдается преимущественный рост тех или иных органов. Процессы дифференциации и формирования органов у растений связаны с синтезом, наличием, распределением и соотношением эндогенных фитогормонов [1, 5–7].

Тип морфогенеза определяется различием в балансе экзогенных гормонов цитокининового и ауксинового рядов [17].

В настоящей статье рассматриваются результаты исследований микро-размножения и культивирования растительного материала (микропобегов – микрочеренков) *E. ulmoides* на питательных средах с различным балансом фитогормонов (ауксинов и цитокининов) [17].

Основная цель исследований – разработка и совершенствование методов культуры *in vitro* для *E. ulmoides* в целях использования в системе сохранения и воспроизводства растительных ресурсов. В соответствии с поставленной целью изучалось влияние методов стерилизации и регуляторов роста на регенерационные процессы *E. ulmoides* на стадиях собственно размножения и укоренения.

Объекты и методы исследования

Отбор черенков эвкоммии вязолистной для экспериментов проводили в питомнике Вьетнамского государственного лесотехнического университета (г. Ханой). В питомнике маточная коллекция *E. ulmoides* выращена из семян, полученных из провинции Лайтяу. Черенки размером 5...7 см нарезали на начальных этапах сезонного развития *E. ulmoides*. В этот период их контаминация значительно меньше, а повышенный гормональный фон способствует более эффективному введению в культуру *in vitro*. Предпочтение отдавалось полуодревесневшим черенкам. Эксперименты по тканевой культуре проходили на базе Института биотехнологии Вьетнамского лесотехнического университета.

Молодые верхушечные побеги несколько раз промывали в разбавленном 5 %-м мыльном растворе, затем ополаскивали дистиллированной водой. После первого этапа стерилизации нарезанные черенки расчленили в стерильных условиях на фрагменты размером 1,5...2,0 см, каждый из которых должен иметь лист и пазушную почку. Затем микропобеги (микрочеренки) сразу же стерилизовали путем погружения их в 70 %-й раствор этанола в течение 30 с и в 0,1 %-й водный раствор $HgCl_2$ на 4, 5, 6 и 7 мин. Далее фрагменты черенков 3 раза промывали стерильной водой и помещали на питательный 0,7 %-й агар.

Для культивирования эксплантов использовали среду Мурасиге–Скуга (MS) [16]. Содержание мезоинозита и витаминов в этой среде устанавливали согласно рекомендациям [8]. Синтетические цитокинины БАП (6-бензиламинопурин), кинетин (6-фурфурилметиламинопурин) и синтетические ауксины НУК (альфа-нафтилуксусная кислота), ИМК (индол-3-масляная кислота) добавляли в разных концентрациях. Тип и концентрацию регуляторов роста варьировали в зависимости от стадии размножения и варианта опыта. Перед добавлением гелеобразующего агента рН всех сред устанавливали на уровне 5,7.

Регенеранты выращивали в культивационном помещении при температуре 20...25 °С и круглосуточном освещении 1250...1500 лк. Количество образцов с регенерацией микропобегов подсчитывали на 21-й день после стерилизации, количество эксплантов с пролиферацией почки и микропобегов с корнями – на 28-й день культивирования на питательной среде.

Качество эксплантов определяли визуально: к хорошим побегам относили экземпляры с темно-зеленой окраской и толстым стеблем; к хорошим корням – толстые, твердые экземпляры с молочно-белой окраской. Высоту микропобегов и длину корней измеряли линейкой. Для расчета статистических показателей использовали дисперсионный анализ Краскела–Уолисса с применением программного обеспечения Statistica 12 [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние продолжительности стерилизации эксплантов *E. ulmoides* на способность к регенерации микропобегов. Для стерилизации растительного материала *E. ulmoides*, взятого из питомника (молодые верхушечные побеги), использовали 70 %-й этанол в течение 30 с и 0,1 %-й водный раствор $HgCl_2$ с экспозицией 4, 5, 6 и 7 мин. Для регенерации микропобегов применяли модифицированную питательную среду MS, содержащую 0,5 мг/л БАП. Результаты стерилизации и регенерации микропобегов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние продолжительности стерилизации растительного материала на регенеративную способность эксплантов

Продолжительность стерилизации		Количество образцов				
		всего, шт.	стерильных		с регенерацией микропобегов	
70 %-й этанол, с	0,1 %-й $HgCl_2$, мин		шт.	%	шт.	%
20	4	30	7	23,3	7	23,3
30	5	30	19	63,3	17	56,7
30	6	30	24	80,0	10	33,3
30	7	30	25	83,3	6	20,0

Примечание. Полужирным шрифтом выделены способы стерилизации, оптимальные для регенерации побегов.

Наивысшая частота регенерации побегов исследуемых образцов оказалась у эксплантов в варианте стерилизации с экспозицией 5 мин в 0,1 %-м растворе $HgCl_2$ – 56,7 %. Количество стерильных образцов в хорошем состоянии при этом способе составляло 63,3 %. Наиболее эффективной процедурой стерилизации стала последовательная обработка 70 %-м этанолом с экспозицией в течение 30 с и в 0,1 %-м растворе $HgCl_2$ с экспозицией 5 мин (рис. 1, а).

С ростом продолжительности стерилизации в $HgCl_2$ до 6...7 мин количество стерильных микропобегов увеличивается с 80,0 до 83,3 % соответственно, однако количество образцов, сохраняющих способность к регенерации микропобегов, уменьшается с 33,3 до 20,0 % соответственно. Наиболее низкими были показатели регенерации побегов на эксплантах растений в варианте стерилизации в 0,1 %-м растворе $HgCl_2$ продолжительностью 7 мин – 20,0 %.

Влияние регуляторов роста на способность к регенерации микропобегов у эксплантов *E. ulmoides*. Чтобы стимулировать регенерацию микропобегов *E. ulmoides* в среду MS добавляли синтетические цитокинины БАП, кинетин и синтетический ауксин НУК в разных концентрациях.

Результаты влияния регуляторов роста на способность к регенерации микропобегов у эксплантов представлены в табл. 2.

В вариантах с добавлением НУК в состав среды MS в концентрации 0,2 мг/л и при увеличивающейся концентрации БАП с 0,5 до 1,0 мг/л микропобеги, как правило, имеют жесткие и темно-зеленые листья, но высота побегов ниже, чем в варианте без НУК.

*a**б**в**г*

Рис. 1. Состояние эксплантов *E. ulmoides* после выращивания на различных вариантах питательных сред: *a* – регенерация микропобегов через 3 (слева) и 5 (справа) недель после помещения эксплантов на среду MS; *б* – адвентивное побегообразование на среде NC5; *в* и *г* – регенерация корней у эксплантов спустя 5 недель на среде R4

Fig. 1 Condition of the *E. ulmoides* explants after cultivation on different growth media: *a* – regeneration of microshoots 3 (left) and 5 (right) weeks after placing the explants on the Murashige and Skoog medium; *б* – adventive shoot formation on the NC5 medium; *в* and *г* – regeneration of the explant roots after 5 weeks on the R4 medium

Таблица 2
Влияние регуляторов роста на способность к регенерации микропобегов у эксплантов *E. ulmoides*

Вариант	Регулятор роста, мг/л			Количество эксплантов			Количество микропобегов, шт.	Коэффициент мультипликации микропобегов	Средняя высота микропобегов, см	Качество эксплантов
	БАП	Кинетин	НУК	с пролиферацией почки		%				
				первичных, шт.	шт.					
NC1	0,5	–	–	30	10	33,3	42	1,4 ± 0,6	1,4 ± 0,4	Неудовл.
NC2	0,5	–	0,2	30	11	36,7	42	1,4 ± 0,6	1,5 ± 0,4	Неудовл.
NC3	0,7	–	–	30	25	83,3	69	2,3 ± 0,9	2,7 ± 0,8	Удовл.
NC4	0,7	–	0,2	30	27	90,0	75	2,5 ± 0,9	2,5 ± 0,7	Хорошее
NC5	1,0	–	–	30	30	100	171	5,7 ± 1,4	4,7 ± 0,9	Хорошее
NC6	1,0	–	0,2	30	30	100	135	5,0 ± 1,2	4,1 ± 0,8	Хорошее
NC7	1,2	–	–	30	28	93,3	102	4,4 ± 1,2	3,7 ± 0,8	Удовл.
NC8	1,2	–	0,2	30	27	90,0	93	4,3 ± 1,3	3,7 ± 0,6	Хорошее
NC9	–	0,5	–	30	10	33,3	42	1,4 ± 0,8	1,2 ± 0,3	Неудовл.
NC10	–	0,5	0,2	30	8	26,7	39	1,3 ± 0,8	1,3 ± 0,4	Неудовл.
NC11	–	1,0	–	30	12	40,0	45	1,5 ± 0,8	1,0 ± 0,5	Неудовл.
NC12	–	1,0	0,2	30	15	50,0	51	1,7 ± 1,1	1,2 ± 0,5	Неудовл.
NC13	0,5	0,2	–	30	22	73,3	60	2,0 ± 0,8	2,5 ± 0,6	Удовл.
NC14	0,7	0,2	–	30	24	80,0	66	2,2 ± 0,8	2,8 ± 0,6	Удовл.
NC15	1,0	0,2	–	30	25	83,3	111	3,7 ± 1,4	2,9 ± 0,8	Удовл.
NC16	1,2	0,2	–	30	28	93,3	78	2,6 ± 0,9	2,8 ± 0,8	Удовл.

Применения: NC1–NC16 – варианты состава регуляторов роста, полужирным шрифтом выделены варианты среды, оптимальные для формирования почек.

Варианты с добавлением кинетина в концентрациях 0,5...1,0 мг/л (NC9–NC12) не пригодны для инициации регенерации микропобегов. Даже добавление в этом случае ауксина в концентрации 0,2 мг/л не улучшает их регенерацию. У побегов было много каллусной ткани, количество эксплантов, давших пролиферацию почки (26...50 %), и коэффициенты размножения (мультипликации) микропобегов (1,3–1,7 раза) были низкими. В этих вариантах наблюдалось плохое качество почек, чахлые побеги, короткие и желтовато-зеленые листья.

В вариантах (NC1–NC8) с добавлением БАП и НУК в разных концентрациях коэффициент мультипликации микропобегов колеблется в пределах 1,4–5,7, а количество эксплантов, давших пролиферацию почки, самое высокое (33...100 %). В этих вариантах экспланты крепкие и темно-зеленые (рис. 1, б).

В варианте NC5 (MS + 1 мг/л БАП) количество эксплантов, давших пролиферацию почки, составляет 100 %, коэффициент размножения побегов – 5,7, побеги хорошо развиты (зеленые, высотой 4,7 см). Этот вариант оптимален для формирования почек. В варианте NC6 (MS + 1 мг/л БАП + 0,2 мг/л НУК) коэффициент размножения микропобегов составляет 5,0, высота микропобегов – 4,1 см, количество листьев в среднем – 8,2 шт./микропобег, микропобеги хорошего состояния, большие и объемные.

В вариантах (NC13–NC16) с добавлением БАП и кинетина в разных концентрациях коэффициент мультипликации колеблется в пределах 2,0–3,7, количество эксплантов, давших пролиферацию почки, достигало 73...93 %. В этих вариантах отмечалось среднее качество почек и желтовато-зеленая окраска листьев. Однако количество эксплантов, давших пролиферацию почки, коэффициент размножения побегов и качество эксплантов уступают варианту только с добавлением БАП. Таким образом, можно считать, что добавление кинетина не подходит для улучшения способности к регенерации микропобегов у эксплантов *E. ulmoides*.

Влияние состава среды на количество и высоту микропобегов достоверно на уровне значимости 0,05 (рис. 2).

Питательные среды в вариантах NC5 (MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л БАП) и NC6 (MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л БАП + 0,2 мг/л НУК) являются лучшими для размножения микропобегов эвкоммии (см. рис. 1, б).

Влияние ауксинов на регенерацию корней у эксплантов *E. ulmoides*. На неразбавленной питательной среде MS с добавкой ИМК и НУК в разных концентрациях экспланты не укоренялись. При этом интенсивно разрасталась каллусная ткань, что способствовало регенерации побегов из каллуса. В некоторых вариантах в месте соприкосновения листа и питательной среды разрасталась каллусная ткань и из каллуса развивались корни. Поэтому опыты по укоренению микропобегов проводили на разбавленной питательной среде – 2/3 MS.

Нормально развитые микропобеги с хорошей пигментацией, высотой 3 см высаживали на питательную среду 2/3 MS с добавлением ауксинов ИМК и НУК в различных концентрациях. Через 4 недели наблюдали регенерацию корней у опытных эксплантов. Результаты зависимости регенерации корней у эксплантов от добавления ауксина приведены в табл. 3.

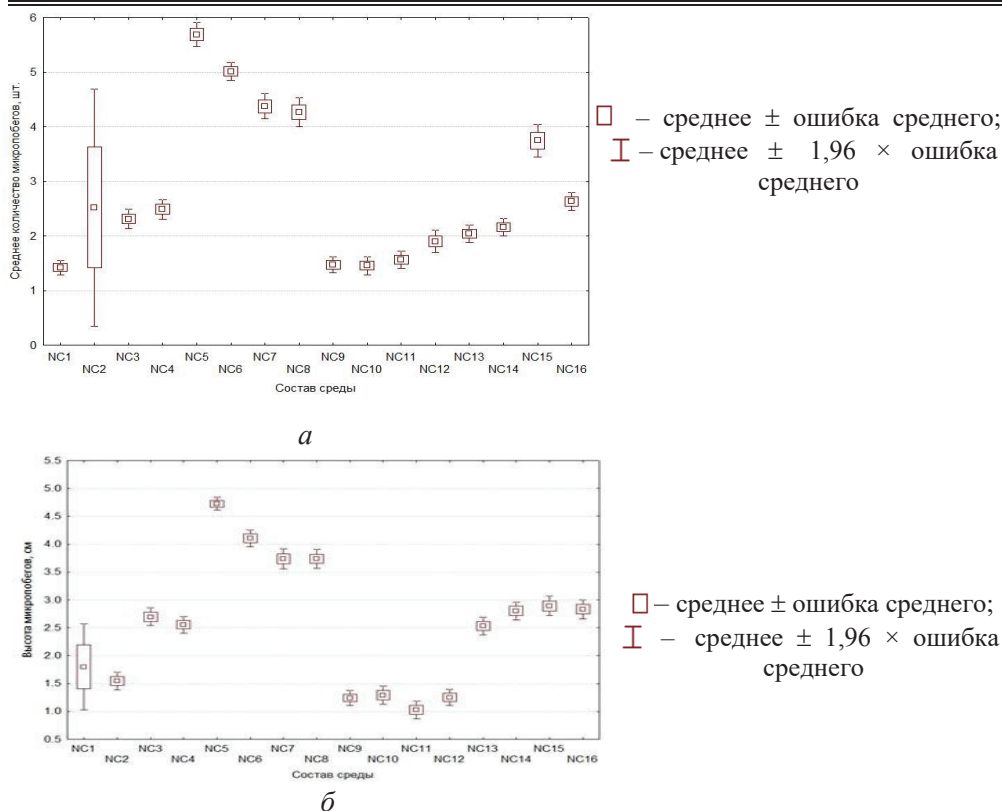


Рис. 2. Различия между образцами состава среды (NC1–NC15) по количеству (а) и высоте (б) микропобегов

Fig. 2. Differences between samples of the medium composition (NC1–NC15) in terms of the number of microshoots (а) and their height (б)

Таблица 3

Влияние ауксинов на регенерацию корней у эксплантов *E. ulmoides*

Вариант	Ауксин, мг/л		Количество микропобегов с корнями, %	Среднее количество корней на побеге, шт.	Средняя длина корня, см	Качество корней
	НУК	ИМК				
R1	0	0	0	0	0	–
R2	0,5	0	10	0,8	0,8	Удовл.
R3	1,0	0	40	1,0	0,9	Удовл.
R4	1,5	0	100	2,9	1,8	Хорошее
R5	2,0	0	70	2,9	1,3	Хорошее
R6	1,0	0,2	70	2,2	1,2	Хорошее
R7	1,0	0,4	90	2,5	2,0	Хорошее
R8	1,5	0,2	90	2,3	1,4	Хорошее
R9	1,5	0,4	70	2,1	1,2	Удовл.
R10	0	0,5	0	0	0	–
R11	0	1,0	0	0	0	–
R12	0	1,5	0	0	0	–
R13	0	2,0	0	0	0	–

Примечание. Полужирным шрифтом выделены варианты среды, оптимальные для формирования корней.

На среде 2/3 MS с добавкой НУК в разных концентрациях (варианты R1–R5) количество эксплантов, регенерирующих корни, составляло 10...100 %. В варианте R4 на питательной среде 2/3MS + 1,5 мг/л НУК количество эксплантов, регенерирующих корни, – 100 %, среднее количество корней – 2,9/побег, средняя длина корня – 1,8 см, качество корней хорошее.

В вариантах (R6–R9) на питательной среде 2/3MS с добавкой ИМК и НУК в разных концентрациях количество эксплантов, регенерирующих корни, составляет 70...90 %. В варианте R7 на питательной среде 2/3MS + 1 мг/л НУК + 0,4 мг/л ИМК количество эксплантов, регенерирующих корни, – 90 %, среднее количество корней – 2,5/побег, средняя длина корня – 2,0 см, качество корней хорошее.

На среде 2/3 MS с добавкой ИМК в разных концентрациях (варианты R10–R13) микропобеги не укоренялись, а каллусная ткань развивалась очень сильно, что способствовало более активному росту адвентивных побегов эксплантов.

Различия между образцами состава среды по количеству корней на побег и длине корня достоверны на уровне значимости 0,05 (рис. 3).

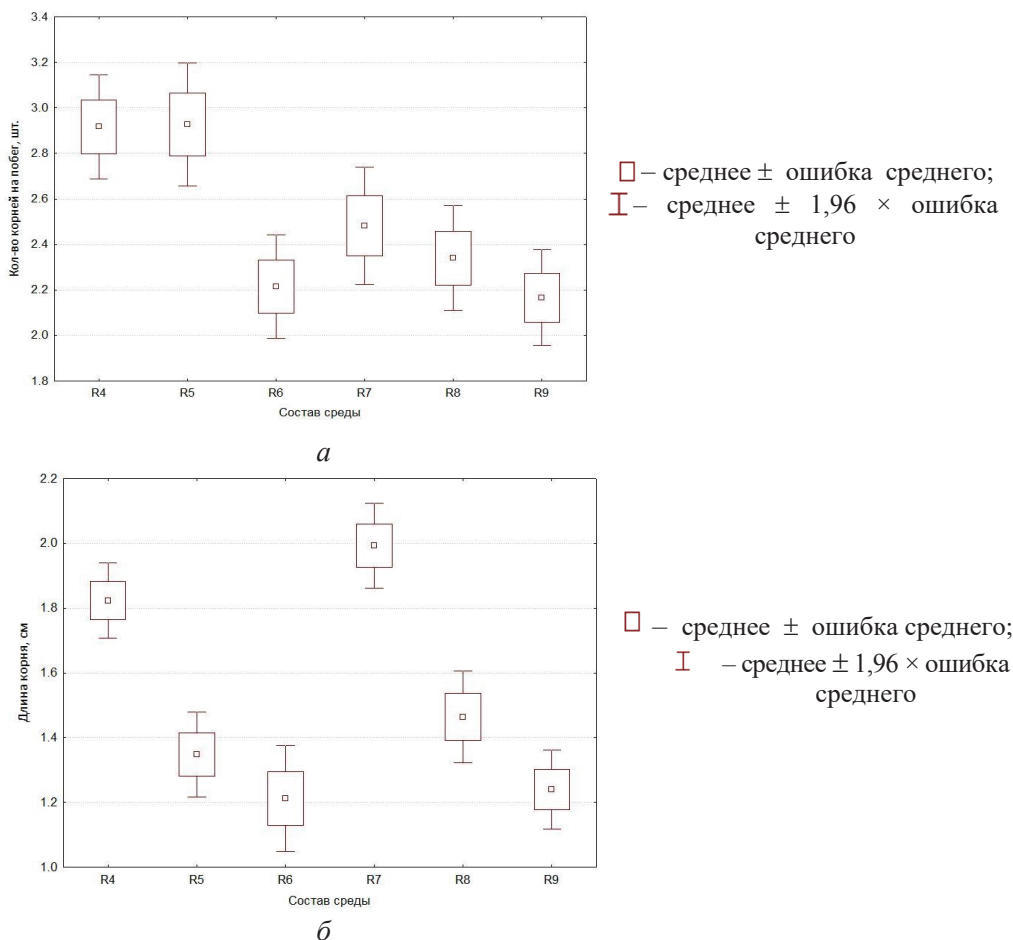


Рис. 3. Различия между образцами состава среды (NC1–NC15) по количеству (а) и длине (б) корней на побег

Fig. 3. Differences between samples of the medium composition (NC1–NC15) in terms of the number (a) and length (b) of roots per shoot

Питательные среды в вариантах R4 (2/3MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л НУК) и R7 (2/3MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л НУК + 0,4 мг/л ИМК) являются лучшими для регенерации корней у эксплантов *E. ulmoides* (см. рис. 1, в, з).

Выводы

1. Лучшей процедурой для стерилизации растительного материала (молодые верхушечные побеги) эвкоммии вязолистной является погружение материала в 70 %-й этанол на 30 с, затем в 0,1 %-й HgCl₂ на 5 мин. Частота регенерации микропобегов составила 56,7 % при их стерильности 63,33 %.

2. Определен оптимальный состав питательной сред для микро-размножения *Eucottia ulmoides* на основе среды Мурасиге–Скуга [16]: MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л БАП; MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л БАП + 0,2 мг/л НУК.

3. Питательные среды 2/3MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л НУК и 2/3MS + 30 г/л сахарозы + 7 г/л агара + 1 мг/л НУК + 0,4 мг/л ИМК являются лучшими из протестированных для регенерации корней эвкоммии вязолистной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алехина Н.Д., Балнокин Ю.В., Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В., Мейчик Н.Р., Носов А.М., Полесская О.Г., Харитонашвили Е.В., Чуб В.В. Физиология растений / под ред. И.П. Ермакова. 2-е изд., испр. М.: ИЦ Академия, 2007. 640 с. [Alekhina N.D., Balnokin Yu.V., Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V., Meychik N.R., Nosov A.M., Poleskaya O.G., Kharitonashvili E.V., Chub V.V. *Plant Physiology*. Ed. by I.P. Ermakova. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 640 p.]

2. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 125 с. [Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. *Statistical Processing of Forestry Research Materials*. Saint Petersburg, Politechpress Publ., 2016. 125 p.]

3. Деревья и кустарники СССР / под ред. С.Я. Соколова. Л.: Изд-во АН СССР, 1954. Т. 3. 872 с. [*Trees and Shrubs of the USSR*. Ed. by S.Ya. Sokolov. Leningrad, AN SSSR Publ., vol. 3, 1954. 872 p.]

4. Калинин Ф.Л., Кушнир Г.П., Сарнацкая В.В. Технология микроклонального размножения растений. Киев: Наук. думка, 1992. 232 с. [Kalinin F.L., Kushnir G.P., Sarnatskaya V.V. *Technology of Microclonal Propagation of Plants*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1992. 232 p.]

5. Лутова Л.А. Биотехнология высших растений. 2-е изд. СПб.: СПбГУ, 2010. 240 с. [Lutova L.A. *Biotechnology of Embryophyta*. Saint Petersburg, SPbU Publ., 2010. 240 p.]

6. Лутова Л.А., Матвеева Т.В. Генная и клеточная инженерия в биотехнологии высших растений / под ред. И.А. Тихоновича. СПб.: Эко-Вектор, 2016. 168 с. [Lutova L.A., Matveeva T.V. *Genetic and Cellular Engineering in Biotechnology of Embryophyta*. Ed. by I.A. Tikhonovich. Saint Petersburg, Eco-Vector Publ., 2016. 168 p.]

7. Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 512 с. [Medvedev S.S. *Plant Physiology*. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2013. 512 p.]

8. Никитина В.В., Вишневецкая М.С. Селекция растений. Культивирование изолированных тканей и органов растений в условиях *in vitro*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 32 с. [Nikitina V.V., Vishnevskaya M.S. *Plant Breeding. Cultivation of Isolated Tissues and Organs of Plants in vitro*: Workshop. Saint Petersburg, Politechpress Publ., 2015. 32 p.]

9. Тахтаджян А.Л. Происхождение и расселение цветковых растений Л.: Наука, 1970. 155 с. [Takhtadzhyan A.L. *The Origin and Distribution of Flowering Plants*. Leningrad, Nauka Publ., 1970. 155 p.].

10. Триль А.В. Эколого-биологические особенности эвкоммии вязолистной *Eucommia ulmoides* Oliv., интродуцированной на Северо-Западном Кавказе, и перспективы ее использования: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Майкоп, 2005. 22 с. [Tril' A.V. *Ecological and Biological Features of Eucommia ulmoides* Oliv. Introduced in the Northwest Caucasus and Prospects for Its Use: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Maikop, 2005. 22 p.].

11. Эвкоммия вязолистная (*Eucommia ulmoides*) // Материалы сайта ООО «Фирма «Здоровье». Режим доступа: <http://lektrava.ru/encyclopedia/evkommiya-vyazolistnaya/> (дата обращения: 22.01.20) [*Eucommia ulmoides*. Materials of the Site ООО Firma Zdorovye].

12. Chen L.-J., Hu T.-W., Huang L.-C. A Protocol toward Multiplication of the Medicinal Tree, *Eucommia ulmoides* Oliver. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 1995, vol. 31, pp. 193–198. DOI: [10.1007/BF02632020](https://doi.org/10.1007/BF02632020)

13. Hu D., Yang Z. Study Seed Germination and Seedling Growth *Eucommia ulmoides*. *Bulletin of Plant Physiology*, 1955, vol. 6, p. 1.

14. Li Y., Zhang Z.-H., Ma X.-H. Effects of Medium Concentration on Callus Growth and Secondary Metabolites of *Eucommia ulmoides*. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, vol. 22, iss. 4, pp. 359–363.

15. Li Z., Wang D., Jiang Z., Tang R. Effects of Basic Media and Culture Conditions on Growth of Calluses and Production of Secondary Metabolites of *Eucommia ulmoides*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, vol. 24, iss. 10, pp. 1912–1916.

16. 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. DOI: [10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x)

17. Skoog F., Miller C.O. Chemical Regulation of Growth and Organ Formation in Plant Tissue Cultures *in vitro*. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1957, vol. 11, pp. 118–131.

18. The Prime Minister Decision No. 1976/QĐ-TTg of October 30, 2013, Approving the Master Plan on Medicinal Plant Development through 2020, with Orientations toward 2030. *Vietnam Law & Legal Forum*, 2013, iss. Nos 09-10, pp. 19–30.

19. Wang D., Wang Y., Li G., Li Z. Du zhong yu zhong yan jiu jin zhan – 杜仲育种研究进展 [Research Process of Breeding *Eucommia ulmoides*]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, iss. 8, pp. 7–10.

20. Cây đỗ trọng và công dụng của cây đỗ trọng. *Materials of the Site Y KHOA VIỆT*. Available at: <http://ykhoviet.vn/cay-do-trong-va-cong-dung-cua-cay-do-trong-6481.html> (accessed 22.01.20).

INTRODUCTION OF *Eucommia ulmoides* Oliv. TO *IN VITRO* CULTURE

A.V. Zhigunov, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAK-8124-2020](https://orcid.org/0000-0001-8707-7526);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8707-7526>

Q.T. Nguyen, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAK-8702-2020](https://orcid.org/0000-0003-2749-2087);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2749-2087>

St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: a.zhigunov@bk.ru

The increasing need for herbal medicines requires the study of not only biological resources of medical plants, but also methods for their reproduction. Of special value are the medicinal plants that have a long history of success in traditional medicine. One of such plants is

Eucommia ulmoides Oliv., which belongs to a rare relict species growing in natural conditions, for the most part, in the undergrowth of humid subtropical forests in China, mainly in the middle course of the Yangtze river. *E. ulmoides* compares favorably with most subtropical plants owing to its significant frost resistance, which makes it possible to cultivate it outside the humid subtropics. It has been widely introduced in Krasnodar Krai and in the Republic of Adygea (Russia) since the mid-20th century and successfully adapted to various environmental conditions in the Northwest Caucasus. The increasing demand for *E. ulmoides* bark can only be satisfied by laying out industrial plantations. However, the difficulties encountered in the traditional seed reproduction of *E. ulmoides* (dioecious species, pollen low quality, parthenocarpy, prolonged seed dormancy, irregular fruiting, long juvenile period, etc.) make scientists turn to modern biotechnological methods of plant propagation. While considering cultivation of planting material, we should focus on highly efficient methods that ensure stable and mass reproduction of the plants under study. An important role is played here by *in vitro* plant regeneration. The effectiveness of biotechnology methods is due to a reduction in timing of obtaining a large number of vegetative progeny of plants difficult for propagation, as well saving of the area required for their cultivation. The conditions for producing an aseptic culture of *E. ulmoides* were chosen based on the results of the studies. The highest degree of sterilization of *E. ulmoides* shoot segments was achieved when the explants were sequentially immersed first in 70 % ethanol (30 s) and then in 0.1 % mercuric chloride solution (5 min). With such a sterilization procedure, 63.3 % of the studied cuttings were made sterile, and 56.7 % of them proved to be viable. The optimal composition of the nutrient medium for regeneration of *E. ulmoides* microshoots has been determined: MS medium complemented with 1 mg/L 6-Benzylaminopurine (BAP) + 0.2 mg/L 1-Naphthaleneacetic acid (NAA). The best media for explant rooting are the following: 2/3 MS + 1.5 mg/L NAA + 30 g sucrose + 7 g agar; 2/3 MS + 1 mg/L NAA + 0.4 mg/L IBA + 30 g sucrose + 7 g agar.

For citation: Zhigunov A.V., Nguyen Q.T. Introduction of *Eucommia ulmoides* Oliv. to *in vitro* Culture. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 38–50. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-38-50

Keywords: *Eucommia ulmoides* Oliv., microclonal propagation, microshoot, sterilization, regeneration, growth regulator.

Поступила 22.01.20 / Received on January 22, 2020

УДК 630*811.4:630*561.24:630*181.62

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-51-63

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ДИНАМИКИ ПРИРОСТА РАННЕЙ И ПОЗДНЕЙ ДРЕВЕСИНЫ СТВОЛА ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО В НАГОРНОЙ ДУБРАВЕ ЮЖНОЙ ЛЕСОСТЕПИ

Н.Ф. Каплина, канд. биол. наук; ResearcherID: [L-9480-2013](https://orcid.org/0000-0001-5999-700X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-700X>

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, п/о Успенское, Московская обл., Россия, 143030; e-mail: kaplina@inbox.ru

Радиальный прирост ствола содержит информацию о росте, развитии и состоянии дерева. Прирост ранней и поздней древесины имеет существенные особенности. Динамика прироста складывается из монотонных и циклических составляющих. На основе закономерностей радиального прироста возможны ретроспективная и прогностическая оценка роста и развития дерева и древостоя. Цель исследования – анализ свойств составляющих и их вклада в динамику прироста ранней и поздней древесины дуба в зависимости от благоприятности периода роста и развития кроны. Объект – нагорная искусственная дубрава, чистая по составу, I класса бонитета. Рассмотрены два периода роста: 1-й – благоприятный (1968–1996 гг.) и 2-й – неблагоприятный (1997–2014 гг.). Изучены три группы по 10 деревьев дуба в каждой, различающихся по типу развития кроны (оригинальная классификация) и ее динамике. Керны ствола взяты на высоте 1,3 м с юго-восточной стороны. Показатели радиального прироста определены на изображениях кернов, отсканированных при разрешении 1200 dpi. Выделены три составляющие динамики – многолетний тренд и циклические составляющие с 12- и 2–5-летними циклами. Изменчивость циклических составляющих динамики прироста ранней древесины ниже, чем поздней, более чем в 2 раза. Вклад составляющей с 2–5-летней циклическостью в динамику прироста ранней и поздней древесины преобладает в благоприятный период роста. Вклад составляющей с 12-летней циклическостью возрастает в неблагоприятный период и тем больше, чем хуже развиты кроны. Переход радиального прироста на более низкий уровень произошел в годы минимума составляющей с 12-летней циклическостью. Между приростом ранней и поздней древесины нет значимой корреляции по составляющей с 2–5-летней циклическостью, которая вносит основной вклад в их соотношение. По остальным составляющим корреляция между приростом ранней и поздней древесины более тесная в неблагоприятный период и с ухудшением развития кроны. Между приростом ранней древесины и приростом поздней древесины предыдущего года корреляция теснее, чем одного и того же года.

Для цитирования: Каплина Н.Ф. Составляющие динамики прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого в нагорной дубраве южной лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 51–63. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-51-63

Ключевые слова: дуб черешчатый, развитие кроны, ранняя и поздняя древесина ствола, динамика радиального прироста, монотонные и циклические составляющие динамики.

Введение

Радиальный прирост ствола содержит информацию о росте, развитии и состоянии дерева под влиянием различных экологических факторов [3, 9, 17 и др.].

Ранняя древесина (РД) дуба черешчатого формируется из запасных пластических веществ одновременно с распусканием листьев, обеспечивая восходящий ток пасоки, а поздняя древесина (ПД) – из ассимилятов текущего года. Особенности динамики прироста РД и ПД дуба черешчатого, а также их соот-

ношения (ПД/РД) – важного показателя плотности древесины [2] и санитарного состояния дуба [1, 14] описаны многими авторами [12, 15, 18, 19, 22, 23, 25].

Динамика прироста складывается из возрастного и других монотонных трендов, а также из циклических составляющих – от 2–3-летних до многовековых [3, 9, 10, 16, 21]. Анализ динамики этих составляющих важен для понимания закономерностей радиального прироста РД и ПД, что необходимо при решении множества лесохозяйственных задач.

Цель – изучить свойства составляющих и их вклад в динамику прироста РД и ПД дуба черешчатого в зависимости от благоприятности периода роста и от развития кроны.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – 80-летняя нагорная искусственная дубрава, чистая по составу (I класс бонитета, полнота – 0,8). Насаждение расположено на южной границе лесостепной зоны (Теллермановское опытное лесничество ИЛ АН РАН). Древостой сформирован дубом поздней феноформы, который более чувствителен к засухам, но реже повреждаем насекомыми-филлофагами, чем дуб ранней феноформы [12].

Развитие крон дуба наблюдалось Н.Н. Селочник с 1985 г. и автором статьи с 2005 г. по настоящее время [7, 8]: 1) раскидистый тип (Р-тип) – обычно I и частично II классов роста и развития по Крафту, с развитой кроной, мощными нижними ветвями, формирующимися в период быстрого роста дерева; 2) зонтиковидный тип (З-тип) – частично II, чаще III класса по Крафту, без нижних крупных ветвей, утраченных в процессе роста в условиях конкуренции; 3) узкокронный тип (У-тип) – обычно IV и V классов, утративший первичные ветви кроны, с заменившими их неразвитыми вторичными ветвями. Классификация деревьев дуба по типу развития кроны может применяться в условиях различных естественных и антропогенных факторов, а также (в отличие от классификаций по социальному статусу) для отдельно стоящих деревьев.

Исследованы два относительно стабильных периода роста с резким переходом между ними: 1-й – благоприятный (1968–1996 гг.) и 2-й – неблагоприятный (1997–2014 гг.). Изучены три группы, по 10 деревьев дуба в каждой, с наиболее характерной динамикой развития кроны [8]: 1) деревья Р-типа как в 1-й, так и во 2-й периоды роста (группа Р-Р); 2) деревья Р-типа в 1-й период и З-типа – во 2-й (группа Р-З); 3) деревья З-типа в 1-й период и У-типа во 2-й (группа З-У).

Керны ствола взяты в 2013–2014 гг. на высоте 1,3 м с юго-восточной стороны. Подготовленные керны сканировали при разрешении 1200 dpi. Ширину прироста РД и ПД измеряли с помощью компьютерной программы GetData Graph Digitizer 2.24 с точностью не менее $\pm 0,02$ мм. Перекрестное датирование проводили визуально по приросту ПД, синхронному у большинства деревьев дуба. Приросты анализировали с 36-летнего возраста деревьев, в период формирования зрелой древесины [20]. Временные ряды прироста РД и ПД для группы деревьев получали как средние значения деревьев по годам.

Значимость различий показателей между периодами роста и группами деревьев оценивали с помощью дисперсионного анализа на уровне $\alpha = 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Во второй половине 1990-х гг. после нескольких засушливых лет прирост по запасу в изученной дубраве снизился более чем на 30 %, отпад повысился

в 3,5 раза, запас за 10 лет практически не изменился [4, 5]. Отметим, что в Теллермановском лесном массиве и ранее, в 1969–1983 гг., наблюдалось падение продуктивности, сопровождавшееся снижением устойчивости и повышением смертности дуба [11]. Однако в объекте исследования отмечено лишь снижение прироста ПД в конце 1980-х. Это можно объяснить высокой устойчивостью дуба в период быстрого роста [5] в связи с его высокой способностью восстановления и роста крон.

Динамика развития крон и усыхания дуба в древостое различалась в зависимости от исходного типа развития кроны. Так, с 1985 по 1996 г. 86 % деревьев Р-типа сохранило свой тип развития кроны и по 7 % перешло в З-тип и усохло. За те же годы только 20 % деревьев З-типа сохранило свой статус, 38 % перешло в У-тип и 42 % усохло. Во 2-й период лишь 32 % деревьев Р-типа сохранило данный тип кроны, 44 % перешло в З-тип, 17 % – в У-тип, 7 % усохло. Лишь 12 % деревьев З-типа сохранило свой тип, 35 % перешло в У-тип и 53 % усохло [8].

Средние диаметры стволов и крон в изученных группах деревьев значительно различались. Диаметр стволов в 1-й и 2-й периоды в группе Р-Р составил соответственно 25,0 и 41,9 см, в группе Р-З – 20,8 и 31,9 см, в группе З-У – 17,9 и 26,0 см. Диаметр крон во 2-й период в этих группах был равен соответственно 7,7, 5,9 и 4,0 м. Категория санитарного состояния в 1-й период была сходной во всех группах (1,7–1,9 балла), а во 2-й период в группе Р-Р несколько выше (1,5 балла), чем в двух других (1,8–1,9 балла). Дефолиация изученных деревьев дуба с 1985 г. не превышала 20 %, кроме 2009–2011 гг., достигая в 2010 г. 50 % у отдельных деревьев Р-З и З-У групп, в связи с чем их категория санитарного состояния снижалась (до 3 баллов).

Прирост РД и ПД, а также ПД/РД значительно различались как по периодам роста, так и по группам деревьев (рис. 1). Средний прирост РД в 1-й и 2-й периоды в группе Р-Р составил соответственно 1,06 и 0,87 мм, в группе Р-З – 0,79 и 0,56 мм, в группе З-У – 0,56 и 0,32 мм. Размах прироста РД у деревьев Р-типа (в среднем в группе) более 0,75 мм, З-типа – 0,4–0,75 мм, У-типа – менее 0,4 мм при среднем числе рядов сосудов соответственно не менее 3, 2 и 1 [6]. Средний прирост ПД в 1-й и 2-й периоды в группах Р-Р, Р-З, З-У был равен соответственно 1,71 и 1,13 мм, 1,28 и 0,67 мм, 0,88 и 0,39 мм. Среднее значение ПД/РД не зависело значительно от типа развития кроны и составило в 1-й период 1,65, приближаясь к максимальному зафиксированному значению (около 2) в нагорных дубравах Теллермановского леса [2]. Во 2-й период его значение снизилось до 1,27, что далеко от критического.

Сглаживанием временного ряда прироста РД и ПД, а также ПД/РД 11-летним скользящим средним получили 1-ю составляющую динамики (С1), включающую монотонные тренды – возрастной и вызванный конкуренцией, а также многолетние циклические составляющие (рис. 2). Так, на 2008–2009 гг. пришлось минимумы векового, Брикнерова и 11-летнего циклов солнечной активности [10]. Первые два из них могли оказать прямое и опосредованное (через климатические факторы) влияние на С1. Сглаживанием временного ряда 5-летним скользящим средним и вычитанием из него тренда С1 получили 2-ю составляющую (С2), с 12-летними циклами, очевидно индуцированную 11-летними циклами солнечной активности. Остаточные отклонения временного ряда от 5-летнего скользящего среднего рассматривали как 3-ю составляющую (С3) с циклами 2–5 лет. Сумма составляющих (ΣС) С1, С2 и С3 является исходным временным рядом.

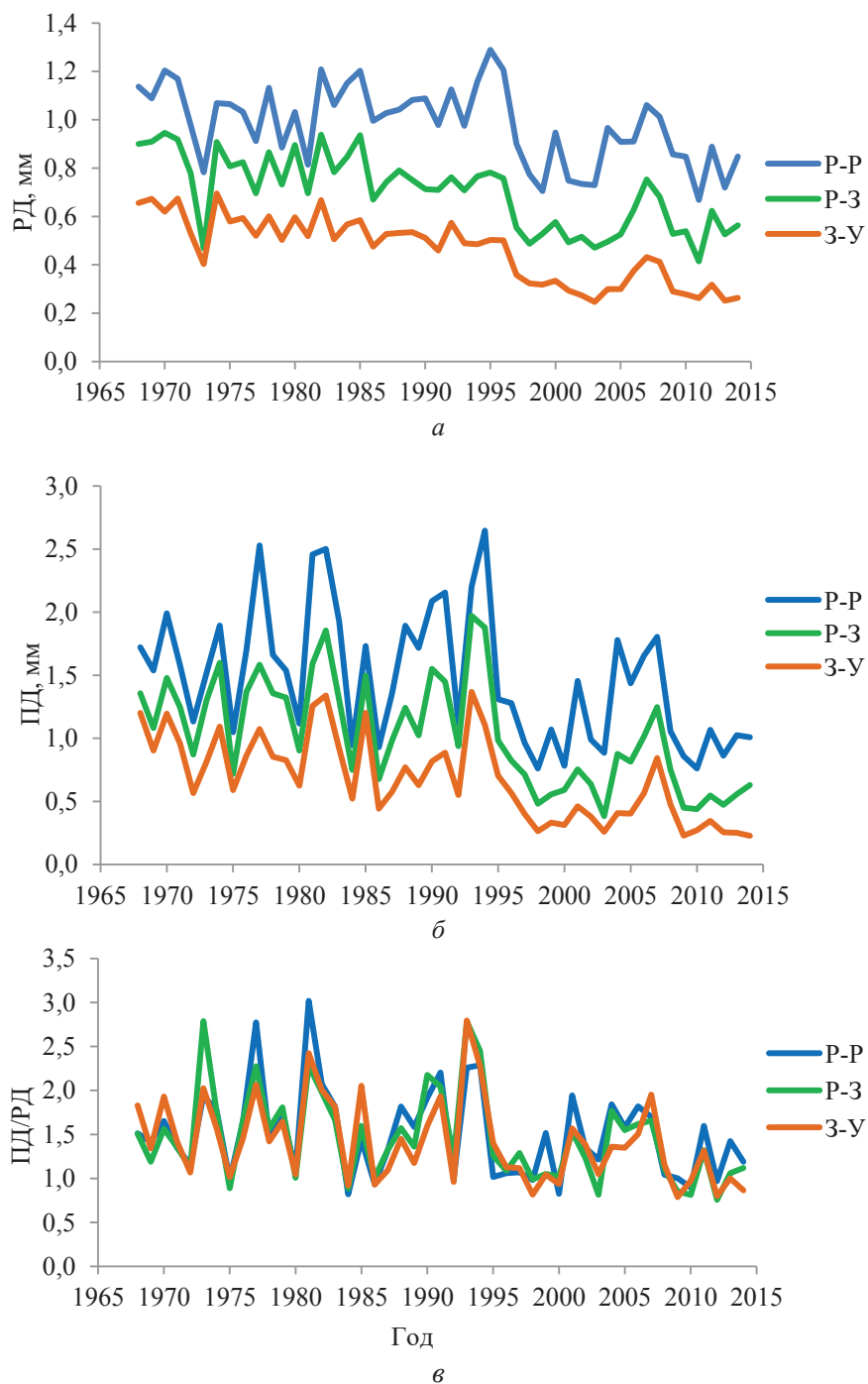


Рис. 1. Динамика прироста РД (а), ПД (б) и их соотношения ПД/РД (в) по группам деревьев

Fig. 1. Dynamics of early (a) and late wood (б) increment and the late wood/early wood ratio (в) by groups of trees

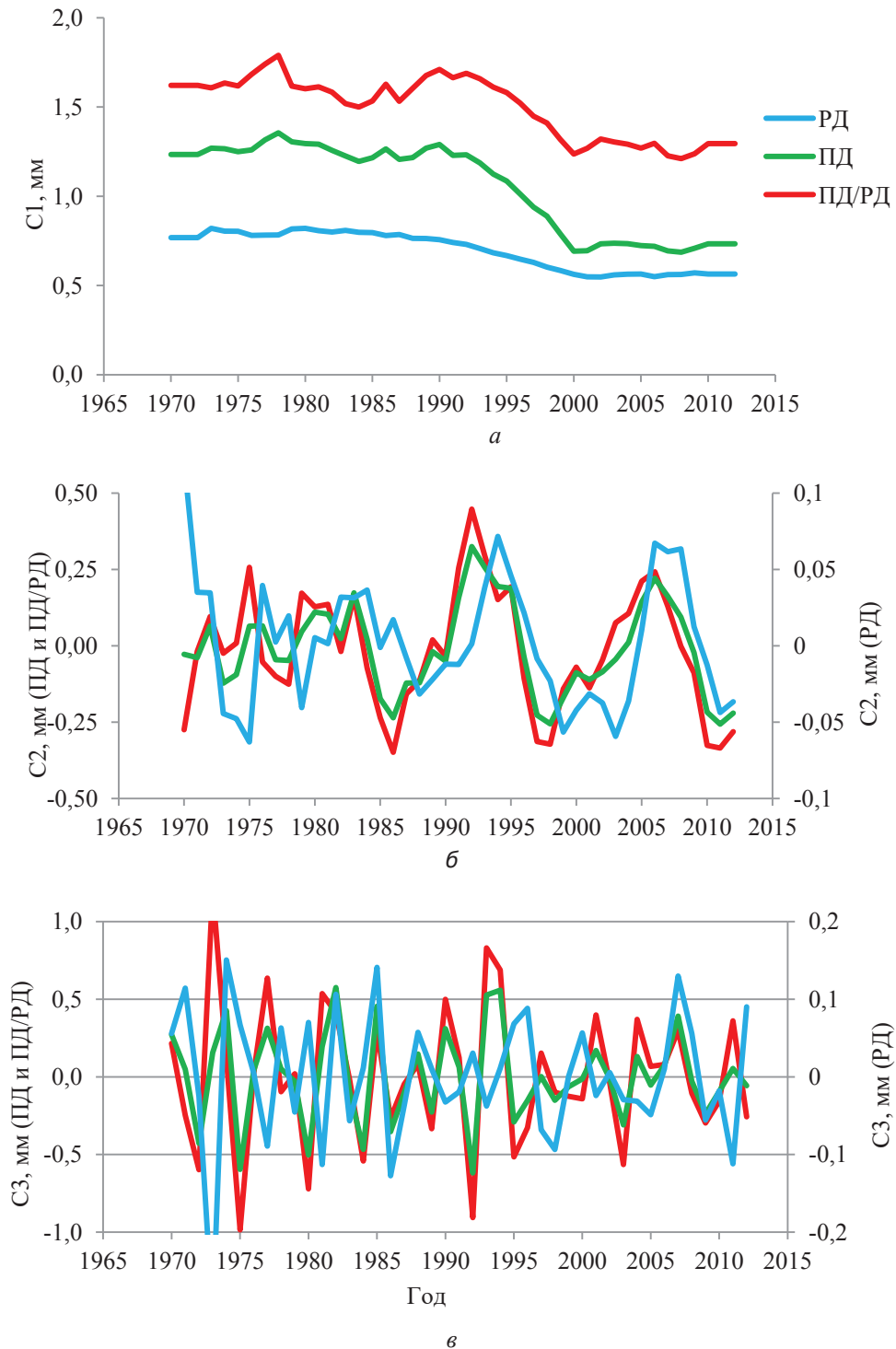


Рис. 2. Составляющие C1 (а), C2 (б) и C3 (в) динамики прироста РД, ПД и их соотношения ПД/РД на примере группы деревьев Р-3

Fig. 2. Components C1 (a), C2 (б) and C3 (в) of the increment dynamics of early and late wood and the late wood/early wood ratio, case study of the middle group of trees (P-3)

Между изученными группами деревьев существуют тесные корреляции по одноименным составляющим показателей прироста (табл. 1). Можно сделать вывод, что все выделенные составляющие имеют закономерный характер, проявившийся в каждой группе деревьев. Тесная корреляционная связь составляющих С1 всех групп обусловлена снижением их прироста (кроме прироста РД группы Р-Р в 1-й период). В 1-й период составляющие С3 связаны более тесно, чем С2, а во 2-й период, наоборот, составляющие С2 различных групп коррелируют сильнее.

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции одноименных составляющих и их суммы
между различными группами деревьев**

Показатель	Составляющая	1970–1996 гг.			1997–2012 гг.			1970–2012 гг.		
		Р-Р, Р-З	Р-Р, З-У	Р-З, З-У	Р-Р, Р-З	Р-Р, З-У	Р-З, З-У	Р-Р, Р-З	Р-Р, З-У	Р-З, З-У
РД	С1	0,17	0,03	0,96	0,94	0,94	0,92	0,91	0,90	0,99
	С2	0,81	0,64	0,91	0,90	0,91	0,94	0,85	0,79	0,92
	С3	0,87	0,82	0,90	0,71	0,71	0,88	0,93	0,90	0,96
	ΣС	0,70	0,49	0,88	0,80	0,76	0,88	0,85	0,76	0,94
ПД	С1	0,91	0,75	0,91	0,90	0,88	0,99	0,99	0,97	0,99
	С2	0,91	0,73	0,89	0,96	0,90	0,97	0,93	0,80	0,92
	С3	0,93	0,90	0,96	0,87	0,76	0,92	0,92	0,88	0,95
	ΣС	0,92	0,84	0,93	0,89	0,79	0,95	0,92	0,87	0,96
ПД/РД	С1	0,56	0,89	0,66	0,57	0,62	0,95	0,88	0,93	0,96
	С2	0,87	0,70	0,85	0,93	0,89	0,94	0,89	0,77	0,89
	С3	0,89	0,91	0,93	0,82	0,77	0,81	0,88	0,89	0,91
	ΣС	0,86	0,85	0,89	0,85	0,81	0,85	0,87	0,85	0,90

Примечание. В табл. 1, 3–5 полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Коэффициенты вариации составляющих С2, С3 и ΣС прироста РД оказались меньше, чем ПД, в 2 раза и более (табл. 2), что согласуется с данными других авторов. Сходные результаты [12] получены в том же древостое для поздней формы дуба за период 1958–1987 гг. на значительно большем количестве кернов (в т.ч. для деревьев, впоследствии усохших). Так, у группы деревьев I и II классов по Крафту (Р-типа) изменчивость прироста РД и ПД и их соотношения была такой же, как по нашим данным, а у группы деревьев III–V классов (З- и У-типов вместе) – примерно на 30 % выше.

Изменчивость составляющих в 1-й и во 2-й периоды в основном повышается в ряду: С1, С2, С3. В 1-й период изменчивость составляющей С3 выше, чем С2 (в среднем по группам): прироста РД – в 2,3 раза, ПД – в 2,5 раза, ПД/РД – в 2,8 раза. Во 2-й период изменчивость составляющей С2 прироста РД и ПД увеличилась соответственно в 1,8 и 1,9 раза, ПД/РД – лишь в 1,2 раза. Коэффициенты вариации остальных составляющих изменились значительно меньше. В результате изменчивость составляющей С3 была выше, чем С2, лишь в 1,3 раза для прироста РД, в 1,1 раза для прироста ПД и в 1,5 раза для ПД/РД.

Переход радиального прироста на более низкий уровень совпал с минимумом составляющей С2, возрастанием ее вклада и повышением изменчивости. Риск такого перехода увеличился по окончании периода быстрого роста древостоя, когда усыхание нижних ветвей в годы минимума 12-летнего цикла

не может компенсироваться их восстановлением и нарастанием в верхней части кроны в годы максимума цикла. Во 2-й период у всех составляющих прироста ПД (в отличие от РД и ПД/РД) наблюдается тенденция увеличения изменчивости с ухудшением развития кроны.

Таблица 2

Коэффициенты вариации составляющих и их суммы, (%)

Показатель	Составляющая	1970–1996 гг.			1997–2012 гг.			1970–2012 гг.		
		Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У
РД	С1	3	6	8	3	4	8	8	15	22
	С2	5	5	5	8	8	11	6	6	7
	С3	10	12	12	11	12	11	10	12	12
	ΣС	12	13	13	14	15	16	16	21	28
ПД	С1	5	6	9	4	10	14	15	24	29
	С2	11	11	13	19	23	26	13	14	16
	С3	29	28	30	23	24	31	28	29	32
	ΣС	30	29	32	32	35	40	36	42	48
ПД/РД	С1	5	4	3	3	5	5	9	11	10
	С2	12	11	11	13	15	14	13	13	13
	С3	32	33	29	23	20	20	30	30	27
	ΣС	35	34	31	28	25	24	34	34	32

Для объединенного периода исследований изменчивость многолетнего тренда С1 значительно выше, чем по отдельным интервалам (возможно, вследствие влияния многолетних циклических составляющих). Это влечет за собой и повышенную изменчивость ΣС. С ухудшением развития кроны дерева роль многолетнего тренда С1 возрастает в изменчивости прироста РД и ПД, но не ПД/РД, вследствие влияния конкурентной составляющей. В результате в изменчивости прироста РД объединенного периода составляющая С1 играет ведущую роль (кроме группы Р-Р, где С1 и С3 вносят сравнимый вклад). В изменчивости прироста ПД у составляющих С1 и С3 сравнимый вклад (кроме группы Р-Р, где изменчивость С3 почти в 2 раза больше), а в изменчивости ПД/РД основной вклад вносит С3. Вклад С2 во всех случаях самый низкий и для выявления его роли в динамике требуется анализ по стабильным периодам.

Составляющие С2 и С3 не имеют значимых корреляций с возрастом (как и между собой и С1). Составляющая С1 динамики всех показателей прироста значимо снижается с возрастом как в 1-й, так и во 2-й периоды роста и тем сильнее, чем хуже развиты кроны, т.е. с увеличением влияния конкуренции: в группе З-У – во всех случаях, Р-З – в 2/3 случаев и Р-Р – в 1/3 случаев (табл. 3). В то же время ΣС не связана значимо с возрастом, кроме снижающегося прироста РД в группе З-У в 1-й период, что также можно объяснить влиянием конкуренции.

Для объединенного периода исследования коэффициенты корреляции составляющей С1 с возрастом более высокие, чем по периодам: от $-0,77$ до $-0,93$, несколько меньшие в группе Р-Р. Также значимо снижение с возрастом ΣС, для прироста РД и ПД тем большее, чем хуже развиты кроны.

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции составляющей С1
и суммы составляющих с возрастом деревьев**

Показатель	Составляющая	1970–1996 гг.			1997–2012 гг.			1970–2012 гг.		
		Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У
РД	С1	0,25	-0,70	-0,78	-0,50	-0,43	-0,62	-0,77	-0,91	-0,93
	ΣС	0,29	-0,23	-0,45	0,19	0,23	-0,03	-0,44	-0,69	-0,83
ПД	С1	-0,36	-0,59	-0,75	-0,37	-0,52	-0,55	-0,86	-0,89	-0,92
	ΣС	0,07	0	-0,15	0,06	-0,01	0,04	-0,40	-0,57	-0,63
ПД/РД	С1	-0,56	-0,15	-0,45	-0,16	-0,65	-0,56	-0,85	-0,83	-0,86
	ΣС	-0,03	0,05	0,03	-0,03	-0,14	0,02	-0,25	-0,34	-0,31

В 1-й период у всех показателей радиального прироста обнаружена тесная корреляционная связь ΣС с наиболее изменчивой составляющей С3, при отсутствии значимых корреляций с составляющими С1 и С2 (кроме прироста РД в группе Р-Р) (табл. 4). Во 2-й период влияние составляющей С2 становится значимым, но ниже, чем С3, роль которой несколько снижается.

Для объединенного периода значимо влияние всех составляющих на ΣС: на прирост РД больше влияет составляющая С1, а затем С3, на прирост ПД, наоборот, больше влияет С3, а затем С1. Причем влияние составляющей С1 увеличивается от деревьев с наиболее развитыми кронами к наименее развитым, а составляющей С3 снижается в том же направлении. На ПД/РД в наибольшей степени влияет С3 независимо от развития кроны. Влияние С2 для объединенного периода во всех случаях наименьшее.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции составляющих с их суммой

Показатель	Составляющая	1970–1996 гг.			1997–2012 гг.			1970–2012 гг.		
		Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У
РД	С1	-0,13	0,09	0,29	-0,08	-0,13	0	0,58	0,72	0,85
	С2	0,58	0,36	0,20	0,59	0,75	0,75	0,58	0,49	0,48
	С3	0,92	0,89	0,81	0,80	0,85	0,69	0,74	0,63	0,43
ПД	С1	0,10	0,16	0,14	-0,14	-0,26	-0,24	0,51	0,66	0,68
	С2	0,24	0,16	0,22	0,71	0,73	0,62	0,44	0,43	0,42
	С3	0,93	0,93	0,91	0,83	0,84	0,85	0,80	0,70	0,67
ПД/РД	С1	0,23	0,30	0,08	0,24	-0,13	-0,15	0,37	0,45	0,36
	С2	0,27	0,16	0,28	0,57	0,55	0,53	0,36	0,33	0,40
	С3	0,92	0,93	0,93	0,88	0,85	0,87	0,88	0,84	0,85

Известно, что корреляция прироста РД с приростом ПД того же года менее тесная, чем предыдущего года (ПД₋₁) [1, 14, 19]. Это объясняется зависимостью и прироста ПД₋₁ и запаса пластических веществ (из которых формируется РД) от условий вегетационного сезона прошлого года. Теснота связи между приростом РД и ПД может изменяться во времени от слабой до очень сильной [13].

По составляющей С3 корреляция прироста как РД и ПД, так и РД и ПД₋₁ в основном не значима. Следовательно, в этой составляющей заключены основные различия динамики РД и ПД. С учетом значительного вклада С3

в динамику прироста, понятна невысокая теснота связи прироста РД и ПД, особенно в благоприятный период.

По С1, С2 и по ΣC теснота связи прироста РД и ПД оказалась ниже, чем РД и ПД₋₁, в 1-й, 2-й и объединенный периоды (табл. 5), очевидно, в результате сдвига прироста РД относительно ПД по циклическим составляющим с 12-летними и более продолжительными циклами. При этом теснота связи как для РД и ПД, так и РД и ПД₋₁ увеличилась во 2-й, неблагоприятный период. С ухудшением развития кроны возросла теснота связи составляющих прироста РД и ПД, в то время как связь РД с ПД₋₁ чаще сходна во всех группах деревьев. Это согласуется с тесной связью ширины ПД с показателями проводящей способности сосудов РД [24] и может объясняться ограничением прироста ПД величиной восходящего тока пасоки. В группе Р-Р теснота связи по составляющей С1 слабее, чем в других группах: в 1-й период как для РД и ПД, так и РД и ПД₋₁ (видимо из-за слабого влияния конкуренции), а во 2-й период – только для РД и ПД.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между радиальным приростом РД и ПД по одноименным составляющим и их сумме

Показатель	Составляющая	1970–1996 гг.			1997–2012 гг.			1970–2012 гг.		
		Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У	Р-Р	Р-З	З-У
ПД	С1	0,35	0,80	0,95	0,60	0,92	0,94	0,93	0,97	0,99
	С2	0,04	0,26	0,59	0,68	0,73	0,80	0,39	0,49	0,70
	С3	-0,13	0,03	0,17	0,25	0,43	0,69	-0,04	0,09	0,24
	ΣC	-0,12	0,06	0,24	0,41	0,60	0,73	0,36	0,60	0,73
ПД ₋₁	С1	0,51	0,74	0,91	0,90	0,91	0,94	0,96	0,96	0,99
	С2	0,54	0,59	0,62	0,91	0,88	0,82	0,73	0,74	0,71
	С3	0,52	0,22	0,13	0,20	0,37	0,48	0,44	0,24	0,18
	ΣC	0,45	0,16	0,26	0,63	0,66	0,67	0,66	0,65	0,73

Выделение циклических составляющих динамики прироста позволяет дать ее прогноз в целях планирования лесохозяйственных мероприятий (рубки ухода, создание лесных культур и т.п.) в годы увеличения и максимума прироста. Так, последний минимум составляющей С2 изученных показателей прироста начался в 2010 г. для ПД и в 2011 г. для РД. Следовательно, следующий минимум наиболее вероятен через 12 лет, соответственно в 2021 и 2022 гг. Данные визуальных наблюдений облиственности дуба не противоречат прогнозу: ее максимум пришелся на 2017 г., в 2018 и 2019 гг. она была средней. В более далекой перспективе возможно повышение уровня прироста на восходящей ветви Брикнерова цикла.

Выводы

1. Выделенные составляющие динамики радиального прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого (многолетний тренд и циклические составляющие с 12- и 2–5-летними циклами) и их соотношения имеют закономерный характер, проявившийся в каждой изученной группе деревьев.

2. Изменчивость циклических составляющих динамики прироста ранней древесины ниже, чем поздней, более чем в 2 раза.

3. Вклад составляющей с 2–5-летней цикличностью в динамику прироста ранней и поздней древесины преобладает в благоприятный период роста. Отношение прироста поздней древесины к ранней определяется в основном составляющей с 2–5-летней цикличностью.

4. Вклад составляющей с 12-летней цикличностью возрастает в неблагоприятный период и тем больше, чем хуже развиты кроны. Переход радиального прироста на более низкий уровень произошел в годы минимума составляющей с 12-летней цикличностью.

5. Между приростом ранней и поздней древесины нет значимой корреляции по составляющей с 2–5-летней цикличностью. По остальным составляющим теснота корреляционной связи прироста ранней и поздней древесины повышается в неблагоприятный период и с ухудшением развития кроны. Кроме того, она возрастает со снижением вклада составляющей с 2–5-летней цикличностью.

6. Между приростом ранней древесины и приростом поздней древесины предыдущего года корреляционная связь теснее, чем одного и того же года, в результате сдвига прироста РД относительно ПД по циклическим составляющим с 12-летними и многолетними циклами.

7. Выделение циклических составляющих позволяет прогнозировать динамику радиального прироста ствола с целью планирования лесохозяйственных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белов А.Н. Потери раннего прироста деревьев разных категорий состояния в очагах насекомых-фитофагов // Лесн. хоз-во. 2005. № 6. С. 42–43. [Belov A.N. Losses of Early Increment of Trees of Different State Categories in the Foci of Phytophagous Insects. *Lesnoye khozyaystvo*, 2005, no. 6, pp. 42–43].

2. Вихров В.Е. Строение и физико-механические свойства древесины дуба. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 265 с. [Vikhrov V.E. *Structure and Physico-Mechanical Properties of Oak Wood*. Moscow, AN SSSR Publ., 1954. 265 p.].

3. Демаков Ю.П. Защита растений. Жизнеспособность и жизнестойкость древесных растений: учебники и учеб. пособия. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 74 с. [Demakov Yu.P. *Plant Protection. Vital Capacity and Viability of Wood Plants*. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 2002. 74 p.].

4. Истомина Я.Г., Каплина Н.Ф. Многолетний опыт по влиянию рубок ухода на нагорные искусственные насаждения дуба черешчатого южной лесостепи // Лесотехн. журн. 2017. Т. 7, № 4. С. 72–81. [Istomina Y.G., Kaplina N.F. Long-Term Experience on the Influence of Cleaning Cutting on Upland Artificial Plantations of English Oak in Southern Forest-Steppe. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal* [Forestry Engineering Russian Journal], 2017, vol. 7, no. 4, pp. 72–81]. DOI: [10.12737/article_5a3cea9e19eec4.85026727](https://doi.org/10.12737/article_5a3cea9e19eec4.85026727)

5. Каплина Н.Ф. Динамика прироста деревьев в нагорных антропогенных дубравах южной лесостепи // Лесоведение. 2006. № 4. С. 3–11. [Kaplina N.F. Dynamics of Tree Increment in Anthropogenic Upland Oak Forests of the Southern Forest-Steppe. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2006, no. 4, pp. 3–11].

6. Каплина Н.Ф. Влияние развития кроны на радиальный прирост ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 2(42). С. 17–25. [Kaplina N.F. Influence of Crown Development on Radial Increment of Early and Late Stem Wood of *Quercus robur*. *Vestnik Povolzhskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology.

Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2019, no. 2(42), pp. 17–25]. DOI: [10.25686/2306-2827.2019.2.17](https://doi.org/10.25686/2306-2827.2019.2.17)

7. Каплина Н.Ф., Селочник Н.Н. Морфология крон и состояние дуба черешчатого в средневозрастных насаждениях лесостепи // Лесоведение. 2009. № 3. С. 32–42. [Kaplina N.F., Selochnik N.N. Morphology of Crowns and *Quercus robur* State in Middle-Aged Forest-Steppe Plantations. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2009, no. 3, pp. 32–42].

8. Каплина Н.Ф., Селочник Н.Н. Текущее и долговременное состояние дуба черешчатого в трех контрастных типах леса южной лесостепи // Лесоведение. 2015. № 3. С. 191–201. [Kaplina N.F., Selochnik N.N. Current and Long-Term State of the English Oak in Three Contrasting Forest Types in Southern Foreststeppe. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 3, pp. 191–201].

9. Ловелиус Н.В. Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 232 с. [Lovelius N.V. *Variability of Tree Increment. Dendroindication of Natural Processes and Anthropogenic Impacts*. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 232 p.].

10. Матвеев С.М. Цикличность в динамике радиального прироста естественных и искусственных сосновых древостоев в борах Центральной лесостепи // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2014. № 5(18). С. 110–116. [Matveev S.M. Cyclicity in Radial Growth Dynamics of Natural and Artificial Scotch Pine Stands in Pine Woods of the Central Forest-Steppe. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2014, no. 5(18), pp. 110–116].

11. Романовский М.Г., Селочник Н.Н. Многолетние падения мощности экосистем // Экосистемы Теллермановского леса / под ред. В.В. Осипова. М.: Наука, 2004. С. 211–217. [Romanovskiy M.G., Selochnik N.N. Long-Term Decline in Ecosystem Capacity. *Ecosystems of the Tellerman Forest*. Ed. by V.V. Osipov. Moscow, Nauka Publ., 2004, pp. 211–217].

12. Рубцов В.В., Уткина И.А. Адаптационные реакции дуба на дефолиацию. М.: Ин-т лесоведения, 2008. 302 с. [Rubtsov V.V., Utkina I.A. *Adaptive Response of Oak to Defoliation*. Moscow, Grif Publ., 2008. 302 p.].

13. Румянцев Д.Е., Александрова М.С., Николаев Д.К. Сопряженность в кратковременной изменчивости ширины ранней и поздней древесины в годичных кольцах лиственниц в условиях Подмоскovie // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2009. № 1(64). С. 56–61. [Rumyantsev D.E., Aleksandrova M.S., Nikolaev D.K. Conjugacy at Short-Term Variability of Summerwood and Latewood Width at Larches Tree Rings at Moscow Region. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2009, no. 1(64), pp. 56–61].

14. Царалунга В.В., Гарнага В.В. Радиальный прирост деревьев дуба различных категорий состояния // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2004. № 1. С. 5–9. [Tsaralunga V.V., Garnaga V.V. Radial Increment of Oak Trees of Different State Categories. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2004, no. 1, pp. 5–9].

15. Doležal J., Mazůrek P., Klimešová J. Oak Decline in Southern Moravia: The Association between Climate Change and Early and Late Wood Formation in Oaks. *Preslia*, 2010, vol. 82, no. 3, pp. 289–306.

16. Douglass A.E. Solar Records in Tree Growth. *Science*, 1927, vol. 65, iss. 1679, pp. 220–221. DOI: [10.1126/science.65.1679.220](https://doi.org/10.1126/science.65.1679.220)

17. Eichhorn J., Roskams P., Potočić N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A. et al. Part IV: Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. *Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests*. Eberswalde, Germany, UNECE, 2016. 49 p.

18. Fajvan M.A., Gottschalk K.W. The Effects of Silvicultural Thinning and *Lymantria dispar* L. Defoliation on Wood Volume Growth of *Quercus* spp. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 276–282. DOI: [10.4236/ajps.2012.32033](https://doi.org/10.4236/ajps.2012.32033)
19. García González I., Eckstein D. Climatic Signal of Earlywood Vessels of Oak on a Maritime Site. *Tree Physiology*, 2003, vol. 23, iss. 7, pp. 497–504. DOI: [10.1093/treephys/23.7.497](https://doi.org/10.1093/treephys/23.7.497)
20. Helińska-Raczkowska L. Variation of Vessel Lumen Diameter in Radial Direction as an Indication of the Juvenile Wood Growth in Oak (*Quercus petraea* Liebl). *Annals of Forest Science*, 1994, vol. 51, no. 3, pp. 283–290. DOI: [10.1051/forest:19940307](https://doi.org/10.1051/forest:19940307)
21. Matveev S., Milenin A., Timashchuk D. The Effects of Limiting Climate Factors on the Increment of Native Tree Species (*Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L.) of the Voronezh Region. *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64, no. 10, pp. 427–434. DOI: [10.17221/36/2018-jfs](https://doi.org/10.17221/36/2018-jfs)
22. Merlin M., Perot T., Perret S., Korboulewsky N., Vallet P. Effects of Stand Composition and Tree Size on Resistance and Resilience to Drought in Sessile Oak and Scots Pine. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 339, pp. 22–33. DOI: [10.1016/j.foreco.2014.11.032](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.032)
23. Nechita C., Chiriloaei F. Interpreting the Effect of Regional Climate Fluctuations on *Quercus robur* L. Trees under a Temperate Continental Climate (Southern Romania). *Dendrobiology*, 2018, vol. 79, pp. 77–89. DOI: [10.12657/denbio.079.007](https://doi.org/10.12657/denbio.079.007)
24. Pérez-de-Lis G., García-González I., Rozas V., Olano J.M. Feedbacks between Earlywood Anatomy and Non-Structural Carbohydrates Affect Spring Phenology and Wood Production in Ring-Porous Oaks. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, iss. 19, pp. 5499–5510. DOI: [10.5194/bg-13-5499-2016](https://doi.org/10.5194/bg-13-5499-2016)
25. Rybníček M., Čermák P., Žid T., Kolář T., Trnka M., Büntgen U. Exploring Growth Variability and Crown Vitality of Sessile Oak (*Quercus petraea*) in the Czech Republic. *Geochronometria*, 2015, vol. 42, iss. 1, pp. 17–27. DOI: [10.1515/geochr-2015-0003](https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0003)

COMPONENTS OF THE INCREMENT DYNAMICS OF EARLY AND LATE WOOD OF *Quercus robur* STEM IN THE UPLAND OAK FOREST OF THE SOUTHERN FOREST-STEPPE

N.F. Kaplina, Candidate of Biology; ResearcherID: [L-9480-2013](https://orcid.org/0000-0001-5999-700X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-700X>

Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21,
p/o Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation; e-mail: kaplina@inbox.ru

The stem radial increment contains information on the tree growth, development, and condition. The early and late wood increment has essential features. The increment dynamics contains monotonous and cyclic components. Retrospective and predictive assessments of growth and development of a tree and a stand based on the patterns of radial increment are possible. The purpose of the article is to analyze the properties of the components and their contribution to the increment dynamics of oak early and late wood, depending on the favorability of growth period and the crown development. The research object was the artificial upland oak forest of the first quality class (pure in composition). Two periods of growth were considered: 1st – favorable (1968–1996) and 2nd – unfavourable (1997–2014). We studied three groups of oak, each group of 10 trees. The groups were distinguished by the development of crown (original classification) and its dynamics. The stem cores were taken at a height of 1.3 m from the southeast side. Indicators of radial increment were defined in the images of cores scanned at 1200 dpi resolution. Three components of the dynamics were identified: a long-term trend and cyclic components with 12- and 2–5-year cycles. The variability of cyclic components of the dynamics of early wood increment was more than twice lower, than that of the late wood. The contribution of the component with 2–5-year cyclicity to the dynamics of early and late wood

increment prevails during the favorable period of growth. The contribution of the component with 12-year cyclicity increases during the unfavorable period and the more, the less developed the crowns. The transition of the radial increment to a lower level occurred during the minimum of the component with 12-year cyclicity. There is no significant correlation between early and late wood increment of the component with 2–5-year cyclicity, which makes the major contribution to their ratio. The correlation between early and late wood increment of other components is closer during the unfavorable period and with a decline in crown development. The correlation between the early and late wood increment of the previous year is closer than that of the same year.

For citation: Kaplina N.F. Components of the Increment Dynamics of Early and Late Wood of *Quercus robur* Stem in the Upland Oak Forest of the Southern Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 51–63. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-51-63

Keywords: English oak, crown development, early and late wood of stem, dynamics of radial increment, monotonous and cyclic components of dynamics.

Поступила 10.08.19 / Received on August 10, 2019

УДК [630*561.21+630*811.42]:582.475.4
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-64-80

РЕАКЦИЯ ШИРИНЫ ГОДИЧНОГО КОЛЬЦА И ДОЛИ ПОЗДНЕЙ ДРЕВЕСИНЫ У СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ПОГОДНЫЕ УСЛОВИЯ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ

С.Р. Кузьмин^{1,2}, канд. с.-х. наук; ст. науч. сотр.; ResearcherID: T-6977-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5391-6536>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок 50, стр. 28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: skr_7@mail.ru

²Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041; e-mail: srkuzmin@sfu-kras.ru

Изучена ширина годичного кольца и доля поздней древесины у деревьев шести контрастных по месту происхождения климатических экотопов (климатипов) сосны обыкновенной, выращиваемых в географических культурах в южной тайге Средней Сибири (Богучанское лесничество) и лесостепи Западной Сибири (Сузунское лесничество) для оценки реакции древесины на условия произрастания. Проведен сравнительный дисперсионный анализ средних значений исследуемых признаков между климатипами в пределах каждого пункта испытания и между пунктами. Исследована динамика элементов древесины и их реакция на погодные условия за многолетний период с помощью корреляционного анализа. Выявлено, что в условиях лесостепи у климатипов в среднем максимальные радиальные приросты отмечаются в возрасте 9 лет, в южной тайге – позднее, в 12–16 лет. У климатипов с юга ареала в условиях лесостепи ширина годичного кольца имеет достоверно меньшие значения, чем у представителей северного происхождения. Для климатипов, перемещенных из более тепло-го климата в южную тайгу, характерны достоверно большие значения ширины годичного кольца, чем у самого северного из исследуемых. Доля поздней древесины у всех изученных климатипов сосны в южной тайге уменьшается по сравнению с лесостепью. Значимая связь доли поздней древесины у климатипов в лесостепи отмечается не только со среднемесячными погодными условиями второй половины вегетационного периода, но и первой, что свидетельствует о более высокой чувствительности структуры их древесины к комплексу климатических и экологических условий географических культур по сравнению с южной тайгой. Результаты исследования показывают, что по средним значениям ширины годичного кольца и доле поздней древесины в лесостепи и южной тайге генетически стабильным является богучанский климатип.

Для цитирования: Кузьмин С.Р. Реакция ширины годичного кольца и доли поздней древесины у сосны обыкновенной на погодные условия в географических культурах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 64–80. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-64-80

Финансирование: Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований по программам РАН № 0356-2019-0024 (Биоразнообразие коренных хвойных и производных лесных экосистем), а также при частичной финансовой поддержке проектов РФФИ (№ 14-04-31366; 20-05-00540).

Благодарность: Автор выражает благодарность Р.В. Роговцеву (начальнику отдела Новосибирской лесосеменной станции Центра защиты леса Новосибирской области, филиала Российского центра защиты леса в г. Новосибирске) за помощь в полевых исследованиях.

Ключевые слова: географические культуры, сосна обыкновенная, ширина годичного кольца, доля поздней древесины.

Введение

Успешность роста сосны в географических культурах зависит от наследственных свойств климатипов и экологических факторов в пункте испытания. Большая часть работ в области изучения географических культур,

включая современные исследования, посвящена росту в высоту, сохранности и стволовой продуктивности [10, 12, 47]. Обобщения результатов географических испытаний содержатся в работах Л.Ф. Правдина и А.Д. Вакурова [16], В.П. Тимофеева [27], А.И. Ирошникова [2], А.И. Чернодубова с соавт. [28], Е.Н. Наквазиной с соавт. [13], В.В. Тараканова с соавт. [26], П.Г. Мельника и М.Д. Мерзленко [9], М.Д. Мерзленко с соавт. [11] и др. Значительно меньше работ, посвященных структуре древесины в географических культурах [18, 19, 37, 39, 46]. В основном эти исследования проведены в одном пункте испытания, однако анализ роста климатипов сосны в разных условиях произрастания позволяет выявить особенности их адаптации, обусловленные разным происхождением и реакцией на экологические факторы, а также установить перспективные климатические экотипы для дальнейшего использования в лесоразведении.

Основные показатели роста деревьев (средняя высота, диаметр, сохранность деревьев) в географических культурах применяются для построения моделей и прогнозов роста потомства сосны обыкновенной в разных климатических условиях [29, 45]. Результаты, полученные для серии географических культур в Швеции и Финляндии, положены в основу моделей для прогнозирования влияния климатических изменений на запас древесины и сохранность потомства сосны обыкновенной при перемещении семян [44]. Изучение реакции ширины годичного кольца (ШГК) и доли поздней (ДП) древесины на погодные условия в разных лесорастительных условиях позволяет выявлять особенности формирования структуры древесины и их лимитирующие факторы у климатипов сосны. В трех географических культурах сосны обыкновенной в Латвии исследование ширины годичного кольца показало, что более продуктивные происхождения из теплых мест имеют меньшую чувствительность роста к погодным условиям и более устойчивы к неблагоприятным погодным изменениям благодаря способности использовать более длинный вегетационный период и усваивать большее количество питательных веществ [39]. Важно отметить, что по сравнению с Сибирью различия по климату в пунктах испытания в Европе [39, 47] менее выражены.

Исследования реакции деревьев на температуру в зависимости от продолжительности вегетационных периодов показали, что деревья из участков с коротким вегетационным периодом реагируют быстрее на повышение температуры и раньше останавливают рост, чем деревья на территориях с более длинным вегетационным периодом [41]. Несовпадение между фенологией роста и окружающей средой может приводить к снижению адаптации и неудовлетворительным показателям роста растений [43].

Переход от ранней древесины к поздней у хвойных находится под влиянием как климатических, так и эндогенных факторов [35, 36, 48]. Во время засухи хвойные виды обычно формируют трахеиды с более толстыми стенками [30, 31, 38], но у сосны обыкновенной, произрастающей в очень сухих местах, встречаются исключения [32].

Цель исследования – анализ реакции ширины годичного кольца и доли поздней древесины на изменение погодных условий у потомства шести контрастных по происхождению климатипов сосны обыкновенной, произрастающих в географических культурах в лесостепи и южной тайге Сибири, а также выявление различий и закономерностей в реакции потомства контрастного происхождения.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются 6 климатических экотипов (далее условно называемые климатипами) сосны обыкновенной (плесецкий, енисейский, богучанский, сузунский, чемальский, балгазынский), тестируемых в 35-летних географических культурах Западной и Средней Сибири. Исследование ШГК и ДП проводилось ранее на примере контрольных климатипов и содержало описание основных методических подходов [4]. Географические культуры в разное время исследовались по росту в высоту, диаметру [6, 17], особенностям ассимиляционного аппарата [3, 7, 15], свойствам почв [14], анатомии древесины [6], устойчивости к грибным патогенам [8].

По климатическим характеристикам районы испытания географических культур в лесостепи и южной тайге имеют различия. Источником современной климатической и погодной информации являются данные проекта «Европейская оценка и база данных климата» (ЕСА&D) [33]. Климатическая характеристика мест происхождения 6 климатипов по архивным справочным материалам [20–25] приведена в табл. 1, показатели роста в 35-летнем возрасте культур – в табл. 2. Подробные данные о географических культурах в лесостепи опубликованы ранее [17].

Таблица 1

Характеристика мест происхождения климатипов

Климатип	Координаты мест происхождения (с. ш. / в. д.)	Сумма температур >10 °С	Сумма осадков, мм		Число дней со среднесуточной температурой >5 °С
			с апреля по сентябрь	за год	
Плесецкий	62° 54' / 40° 24'	1353	387	691	141
Енисейский	58° 25' / 93° 00'	1640	332	572	142
Богучанский ¹	58° 22' / 97° 12'	1682	297	458	139
Сузунский ²	53° 45' / 82° 16'	2050	358	583	161
Чемальский	51° 24' / 86° 00'	2010	437	561	173
Балгазынский	51° 00' / 95° 12'	1772	303	398	158

Примечание. Места расположения пунктов испытания: 1 – южная тайга; 2 – лесостепь.

Таблица 2

Средние показатели роста климатипов в 35-летних географических культурах

Климатип	Южная тайга			Лесостепь		
	С, %	В, м	Д, см	С, %	В, м	Д, см
Плесецкий	59	15,2	11,8	27	16,3	16,3
Енисейский	24	14,6	14,0	11	12,7	15,5
Богучанский	46	15,8	14,6	30	16,4	16,1
Сузунский	18	16,8	15,6	35	16,8	16,9
Чемальский	17	15,8	15,1	35	16,1	15,3
Балгазынский	44	15,7	12,3	28	17,9	17,8

Примечание. С – сохранный; В – высота; Д – диаметр.

По сравнению с работой по контрольным климатипам [4] в данном исследовании увеличена выборка исследуемых деревьев. В сравнительном анализе анатомических характеристик изучалось по 10 деревьев каждого климатипа. Образцы отбирались в средних рядах древостоя каждого климатического экотипа, высота и диаметр отобранных деревьев достоверно не отличались от средних показателей для климатипа. Для отбора образцов на высоте 20 см от поверхности почвы использовался приростной бурав. Древесный керн включал два противоположных радиуса, результаты по ним усреднялись для дерева. Усредненные значения получены по данным, показывающим значимые внутренние межсерийные корреляции для каждого климатипа. Трахеиды в радиальных рядах относились к поздним в том случае, когда радиальный диаметр просвета клеток не превышал радиальную толщину клеточной стенки более чем в 4 раза [42].

Результаты исследования и их обсуждение

ШГК в южной тайге. При сравнении ШГК у сосны разного происхождения необходимо иметь представление о динамике радиального роста, одним из важных моментов при этом является возраст формирования максимальных приростов. В ходе анализа радиального роста за 23-летний период были выявлены максимальные значения ШГК у исследуемых климатипов. Деревья плесецкого и богучанского климатипов, являющихся северными по месту происхождения, в условиях южной тайги формируют максимальные радиальные приросты в среднем на 1 год раньше, чем южные (чемальский и балгазынский), и на 4 года раньше, чем южный сузунский климатип. Средний возраст максимального радиального роста у плесецкого и богучанского составляет 12 лет, у енисейского – 13 лет, при этом индивидуальное варьирование признака находится в пределах 11–17 лет. Средний возраст максимальных приростов у климатипов с юга ареала наступает у чемальского и балгазынского в 13 лет, у сузунского – в 16 лет с индивидуальным варьированием признака 12–17 лет.

Наибольшие средние значения ШГК за 23-летний период отмечаются у сузунского (3,12 мм) и енисейского (2,61 мм) климатипов (рис. 1). Согласно ранговому дисперсионному анализу Краскера–Уоллиса, выборка сузунского климатипа достоверно отличается от остальных при наибольшем среднем значении ($p < 0,001$), енисейский климатип также имеет достоверные различия с остальными ($p < 0,05$). Средняя ШГК у чемальского (2,45 мм) и контрольного сузунского (2,23 мм) климатипов имеет промежуточное значение, их выборки не отличаются достоверно друг от друга, но чемальский климатип достоверно ($p < 0,001$) отличается от плесецкого (1,99 мм) и балгазынского (2,17 мм). Таким образом, наименьшая средняя ширина годичного кольца в южной тайге регистрируется у самого северного из исследуемых – плесецкого климатипа.

ШГК в лесостепи. В географических культурах в лесостепи различий по возрасту формирования максимальных радиальных приростов между климатипами не выявлено. Средний максимум у всех климатипов сосны отмечается в возрасте 9 лет. У северных климатипов (плесецкого, богучанского и енисейского) индивидуальные максимальные приросты фиксируются в 9–12 лет, у южных (сузунского, чемальского и балгазынского) – в 6–12 лет. Наибольшие средние значения ШГК за 23-летний период регистрируются у енисейского (2,37 мм), богучанского (2,10 мм) и плесецкого (2,04 мм) климатипов. Все они достоверно отличаются от контрольного сузунского климатипа и остальных южных климатипов (рис. 1).

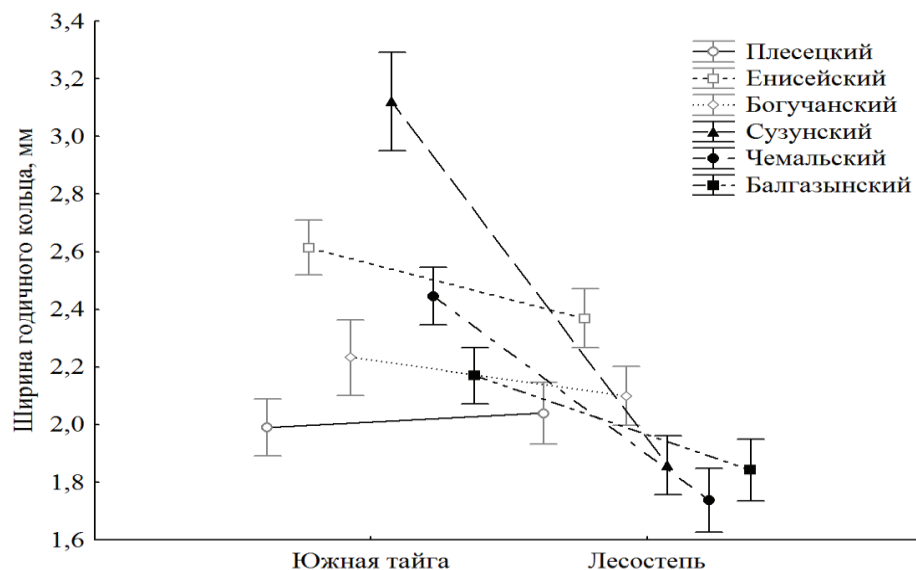


Рис. 1. Средняя ШГК (планки погрешности – 95 %-й доверительный интервал)

Fig. 1. Average tree-ring width (error bars – 95 % confidence interval)

Сравнительный анализ между двумя участками показал, что у всех климатипов в лесостепи ШГК достоверно меньше, чем в южной тайге, исключения составляют богучанский и плесецкий, у которых достоверных различий нет.

Связь ШГК с погодными условиями в южной тайге. В географических культурах в южной тайге у климатипов отмечаются существенные различия в корреляционной связи между индексами средней ШГК и погодными условиями. При анализе связи с температурным фактором выявлено, что значимое положительное влияние температуры на ШГК проявляется в разной степени в апреле, мае и августе (рис. 2).

На формирование ШГК плесецкого и сузунского климатипов достоверное влияние оказывает температура апреля. С температурой мая значимая связь проявляется только у ШГК северных климатипов. Достоверные связи выявлены с температурой августа у енисейского, контрольного богучанского, чемальского и балгазынского климатипов. При усреднении температуры нескольких месяцев высокие коэффициенты корреляции ($r = 0,40-0,55$; $p < 0,01-0,05$) со средними температурами мая и августа получены у балгазынского, апреля и августа – у сузунского, августа и сентября – у чемальского, апреля, мая и августа – у плесецкого, мая, августа и сентября – у енисейского и богучанского климатипов. Причиной значимой корреляции ШГК у плесецкого климатипа с температурой апреля в южной тайге является его реакция на более теплые условия в пункте испытания по сравнению с местом его происхождения в средней тайге, которая выражается в раннем начале вегетации. Реакция сузунского климатипа, проявляющаяся в наличии значимой положительной корреляционной связи индекса ШГК с температурой апреля, показывает более широкую норму реакции у него по сравнению с остальными климатипами из теплообеспеченных мест происхождения. Известно, что норма реакции популяций достигает максимального значения в более жестких для них экологических условиях, чем условия окружающей среды в пункте их происхождения [40]. Вероятно, благодаря этому деревья сузунского климатипа в условиях южной тайги способны демонстрировать относительно большую ширину годичных колец.

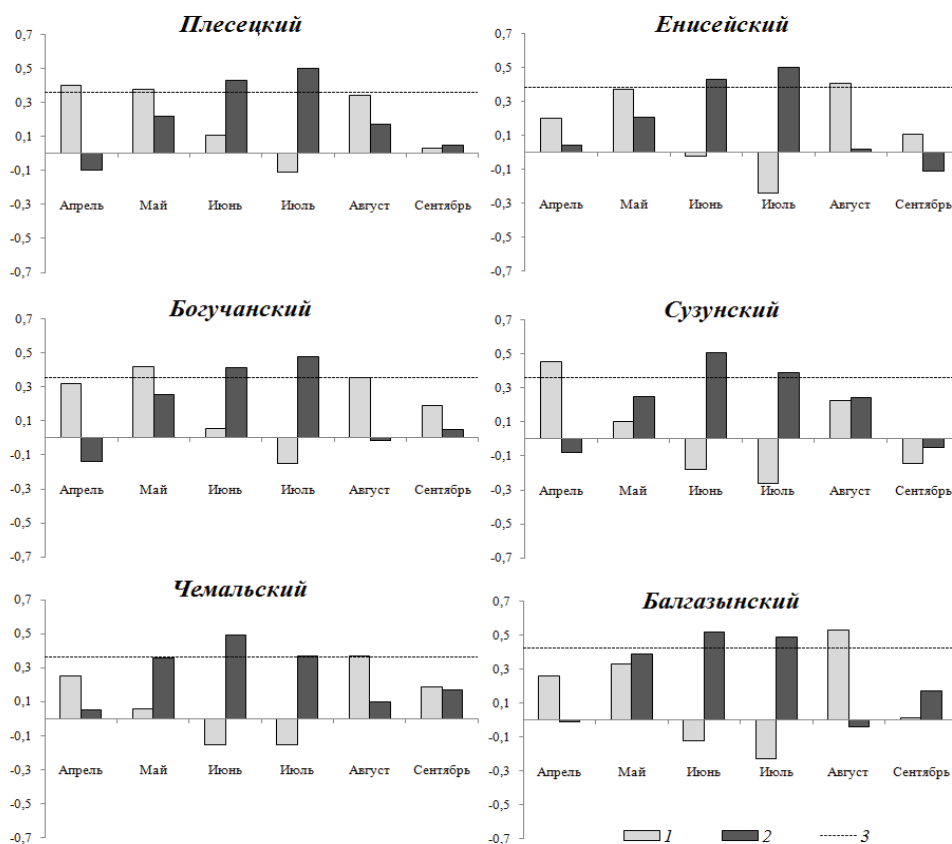


Рис. 2. Коэффициенты корреляции индексов ШГК со среднемесячной температурой (1) и месячным количеством осадков (2) в условиях южной тайги (3 – уровень значимости, $p < 0,05$)

Fig. 2. Correlation coefficients of tree-ring width indices with average monthly temperature (1) and monthly precipitation (2) in the southern taiga conditions (3 – level of significance, $p < 0.05$)

Анализ связи ШГК с осадками в южной тайге показал значимые коэффициенты корреляции с осадками июня и июля у всех климатипов. Наибольшие коэффициенты корреляции для южных климатипов выявлены с осадками июня, для северных – с осадками июля ($r = 0,48-0,52$; $p < 0,01$). Высокие коэффициенты корреляции ($r = 0,61-0,77$; $p < 0,001$) между ШГК климатипов и суммой осадков с мая по июль отмечены у богучанского, с апреля по июль – у енисейского и балгазынского, с апреля по сентябрь – у чемальского, с мая по август – у плесецкого и сузунского климатипов.

Благодаря анализу средней ШГК у сосны в географических культурах и оценке ее связи с температурой и осадками в период вегетации за 23-летний период можно объяснить особенности роста древесины у некоторых климатипов. Так, сузунский климатип в южной тайге сохраняет способность к формированию большего количества трахеид в конце сезона за счет генетической памяти о длинном вегетационном периоде в пункте происхождения. По сравнению с другими климатипами у сузунского отмечается наибольший коэффициент корреляции с осадками августа, очевидно, что условия увлажнения в южной тайге способствуют формированию широких годичных колец.

Северный плесецкий климатип, несмотря на высокие корреляции с температурой и осадками в начале вегетации, имеет наименьшую среднюю ширину годичного кольца. Причиной является общий низкий темп роста в высоту и по диаметру, обусловленный генетическими особенностями, сформированными в пункте происхождения.

Связь ШГК с погодными условиями в лесостепи. В лесостепи у всех исследуемых климатипов отмечаются отрицательные коэффициенты корреляции между индексами ШГК и среднемесячными значениями температуры (рис. 3).

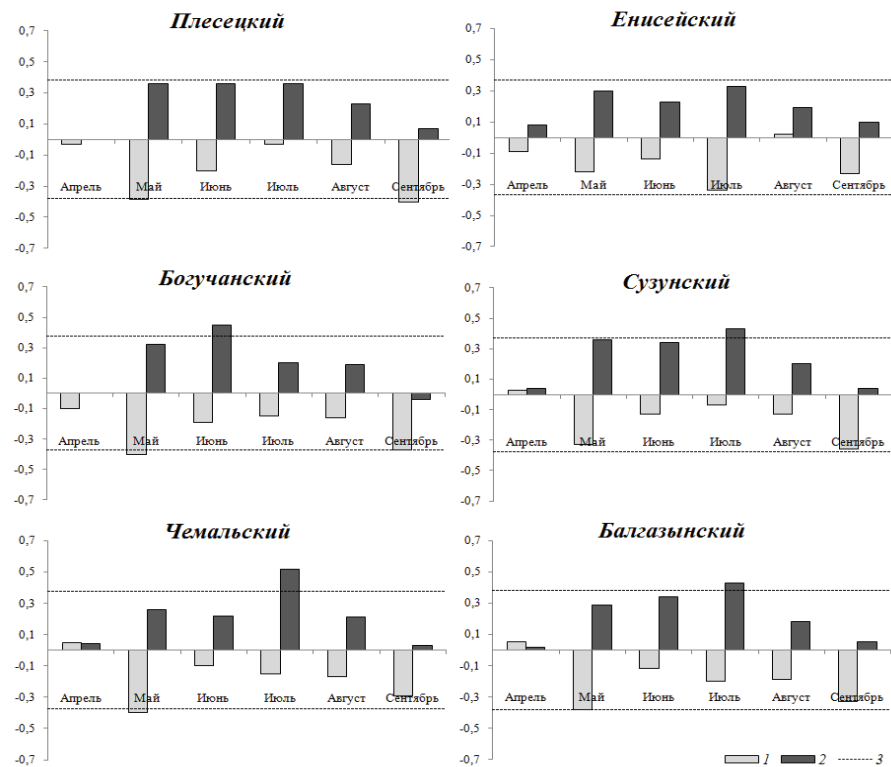


Рис. 3. Коэффициенты корреляции индексов ШГК со среднемесячной температурой (1) и месячным количеством осадков (2) в условиях лесостепи (3 – уровень значимости, $p < 0,05$)

Fig. 3. Correlation coefficients of tree-ring width indices with average monthly temperature (1) and monthly precipitation (2) in the forest-steppe conditions (3 – level of significance, $p < 0.05$)

Значимые отрицательные коэффициенты корреляции выявлены между средней температурой мая и индексами ШГК у плесецкого, богучанского, чемальского и балгазынского климатипов ($r = -0,38-0,40$; $p < 0,05$). Достоверная связь отмечается между ШГК и температурой сентября у плесецкого климатипа ($r = -0,40$; $p < 0,05$). При анализе средней температуры за 5 месяцев (с мая по сентябрь) достоверные коэффициенты корреляции обнаружены у всех климатипов, кроме плесецкого и енисейского.

В лесостепи в отличие от условий в южной тайге корреляция индексов ШГК и температуры только отрицательная. Причиной этого является тот

факт, что в данных условиях лимитирующим фактором роста деревьев служат осадки, а повышение температуры усиливает дефицит влаги и оказывает негативное влияние на продолжительность формирования клеток ксилемы. Связь индексов ШГК исследуемых климатипов с суммой осадков с мая по август в лесостепи выражена четче ($r = 0,52-0,64$; $p < 0,01$) у всех климатипов, за исключением енисейского, имеющего наибольшую связь с суммой осадков с апреля по август ($r = 0,52$; $p < 0,01$). Все 3 северных климатипа (плесецкий, енисейский, богучанский) в условиях лесостепи формируют в среднем более широкие годовые кольца по сравнению с южными за счет удлинения вегетационного периода при раннем начале и позднем конце вегетации.

Сравнительный анализ ДП у одних и тех же климатипов в разных географических культурах показал значимое ($p < 0,01$) увеличение значения признака в условиях лесостепи (рис. 4). Слабые различия между участками отмечаются у контрольных вариантов – богучанского и сузунского климатипов ($p < 0,05$).

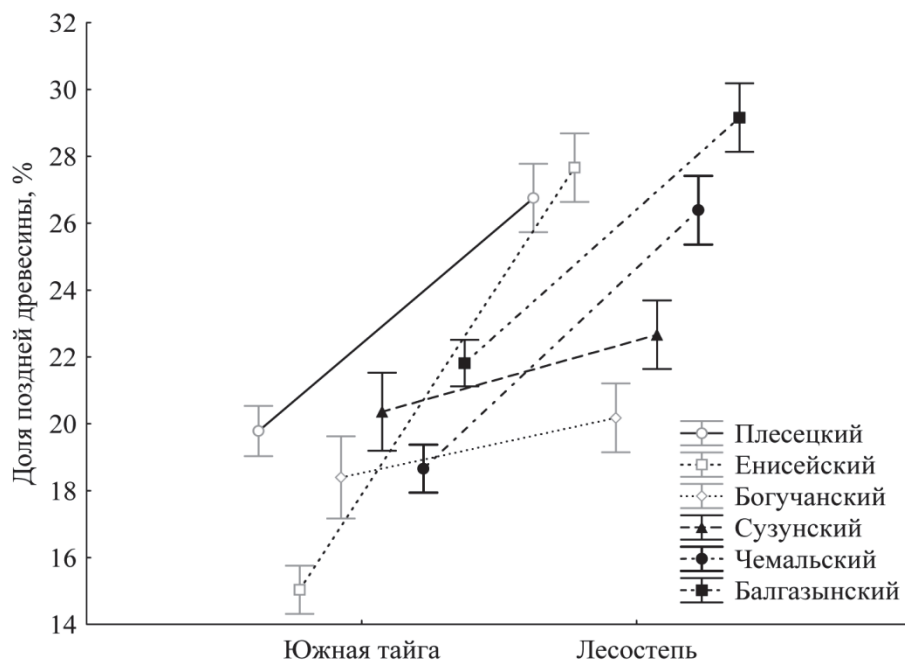


Рис. 4. Доля поздней древесины (планки погрешности – 95 %-й доверительный интервал)

Fig. 4. Latewood content (error bars – 95 % confidence interval)

В лесостепных условиях у богучанского климатипа из южной тайги значение ДП достоверно меньше, чем у контрольного сузунского, у остальных климатипов этот показатель значительно выше. В географических культурах в южной тайге ДП енисейского климатипа меньше, чем в контроле и у остальных климатипов. Достоверно большая ДП, как в условиях южной тайги, так и лесостепи, отмечается у балгазынского климатипа с юга ареала. Сузунский климатип в качестве интродуцента в южной тайге достоверно отличается большей ДП от контроля.

Связь ДП с погодными условиями в южной тайге. В отличие от выявленной корреляции погодных условий с индексами ШГК, корреляции с индексами ДП у климатипов более разнообразны и показывают связи с разными этапами вегетации. ДП всех климатипов в условиях южной тайги имеет положительную связь с температурой августа. Отрицательные связи у большинства климатипов проявились с температурой июля, значимая связь отмечена только для контрольного богучанского, который имеет достоверно высокую отрицательную корреляцию между индексом ДП и средней температурой июля ($r = -0,56$; $p < 0,01$), с осадками июля связь значимая положительная ($r = 0,41$; $p < 0,05$) (рис. 5). Вероятно, в июле у богучанского климатипа происходит формирование дополнительных клеток, которые обладают характеристиками поздней древесины, поэтому более влажные условия способствуют увеличению их количества.

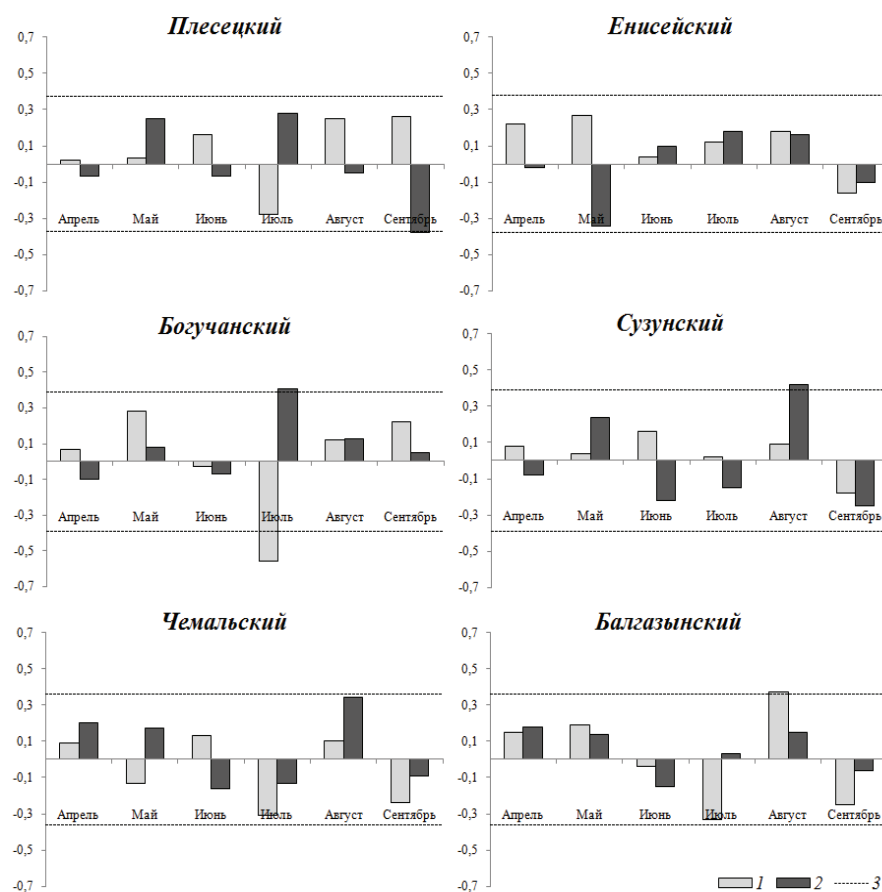


Рис. 5. Коэффициенты корреляции индексов ДП со среднемесячной температурой (1) и месячным количеством осадков (2) в условиях южной тайги (3 – уровень значимости, $p < 0,05$)

Fig. 5. Correlation coefficients of latewood content indices with average monthly temperature (1) and monthly precipitation (2) in the southern taiga conditions (3 – level significance, $p < 0.05$)

Достоверная корреляционная связь ДП отмечается у енисейского климатипа с комбинацией температуры и осадков (отношением средней температуры апреля и мая к количеству осадков апреля и мая ($r = 0,46$; $p < 0,05$)), небольшие положительные температуры и высокое количество осадков в начале вегетационного периода увеличивают долю ранней древесины (ДР) у енисейского климатипа, уменьшая ДП. Значимого прямого влияния среднемесячной температуры во второй половине вегетационного периода на ДП у енисейского климатипа не выявлено по сравнению с остальными климатипами, поэтому основная продукция клеток у этого происхождения в географических культурах южной тайги связана с формированием клеток ранней древесины. У плесецкого климатипа во второй половине вегетационного периода отмечается достоверная корреляционная связь ДП с отношением средней температуры августа и сентября к количеству осадков за этот период ($r = 0,64$; $p < 0,001$). Высокие температуры и низкое количество осадков августа и сентября способствуют снижению радиальных размеров трахеид, тем самым увеличивая ДП у плесецкого климатипа.

Процессы развития поздних трахеид в южной тайге у сузунского климатипа протекают активно: чем больше осадков выпадает в августе, тем больше у этого климатипа ДП ($r = 0,42$; $p < 0,05$). В новых условиях роста у сузунского климатипа активное формирование ДП сдвинуто на более поздний срок по сравнению с контрольным богучанским, у которого основное влияние на ДП оказывают погодные условия июля.

Отрицательная корреляционная связь отмечается у ДП южного чемальского климатипа со средней температурой июля и сентября ($r = -0,42$; $p < 0,05$). У балгазынского климатипа имеется положительная связь с отношением средней температуры августа к средней температуре июля и сентября ($r = 0,55$; $p < 0,05$). Низкие температуры июля обеспечивают условия формирования большего количества клеток, которые впоследствии под воздействием высоких температур августа демонстрируют уменьшенные радиальные размеры и более толстые стенки, соответствующие клеткам поздней древесины [1, 34]. Низкие температуры сентября позволяют клеткам поздней древесины формироваться с повышенным радиальным размером, способствуя увеличению общей ДП древесины.

Связь ДП с погодными условиями в лесостепи. В лесостепи у местного сузунского климатипа отмечается значимая положительная корреляционная связь ДП со средней температурой апреля (рис. 6).

Достоверная связь ДП со средней температурой апреля и июня наблюдается у богучанского климатипа ($r = 0,39$; $p < 0,05$). Кроме того, у него имеется значимая отрицательная корреляционная связь с осадками апреля. Сузунский климатип показывает значимую отрицательную корреляционную связь с количеством осадков апреля и июня ($r = -0,50$; $p < 0,01$), как и балгазынский климатип ($r = -0,40$; $p < 0,05$). Через прямое влияние погоды на формирование числа клеток в ранней древесине проявляется косвенное влияние на ДП. Вероятно, из-за раннего начала вегетационного периода и высокой продуктивности ДР в условиях лесостепи у богучанского и сузунского климатипов отмечаются низкие значения ДП по сравнению с остальными климатипами (см. рис. 4).

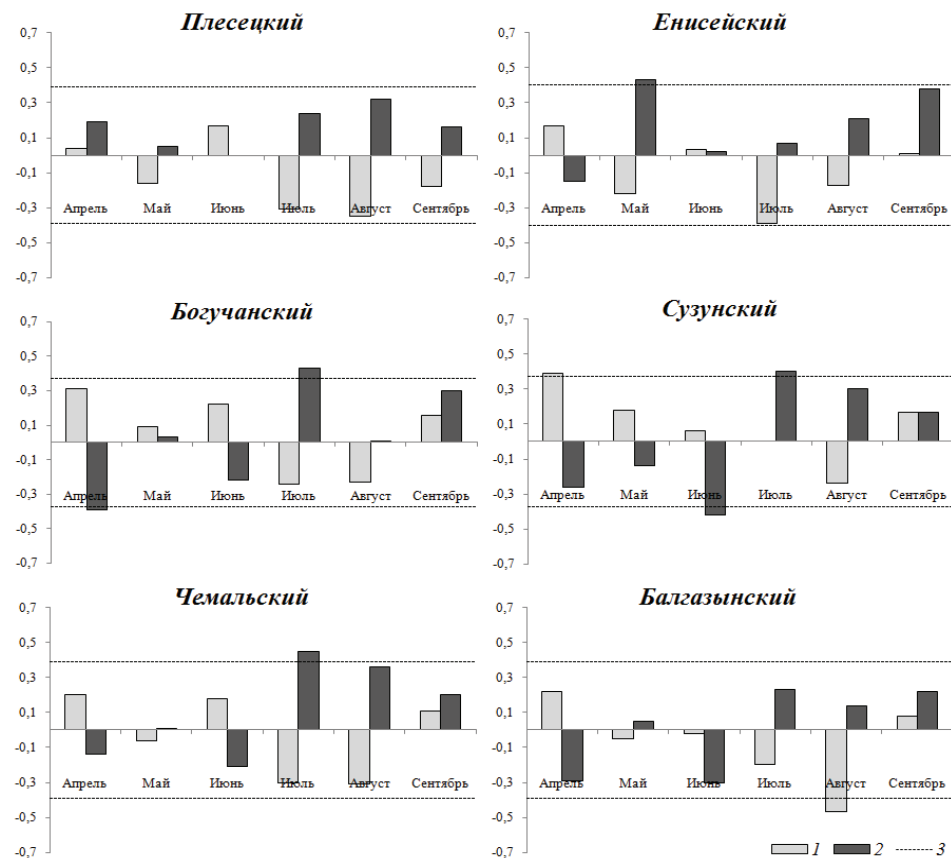


Рис. 6. Коэффициенты корреляции индексов ДП со среднемесячной температурой (1) и месячным количеством осадков (2) в условиях лесостепи (3 – уровень значимости, $p < 0,05$)

Fig. 6. Correlation coefficients of latewood content indices with average monthly temperature (1) and monthly precipitation (2) in the forest-steppe conditions (3 – level of significance, $p < 0.05$)

Достоверные отрицательные связи ДП со средними температурами летних месяцев у 4 климатипов имеют схожие значения ($r = -0,41-0,47$; $p < 0,05$). У енисейского климатипа отмечается связь с температурой мая и июля, у чемальского – июля и августа, у балгазынского – августа, у плесецкого – с июля по сентябрь. Дефицит влаги в условиях лесостепи приводит к более раннему переходу к поздней древесине, в связи с чем высокие температуры отрицательно сказываются на количестве клеток в ней.

Положительное влияние осадков на ДП у енисейского климатипа начинается раньше всех – в мае ($r = 0,43$; $p < 0,05$), объединенная сумма осадков мая и сентября показывает наибольшее значение связи ($r = 0,1$; $p < 0,01$). Причем с осадками сентября значимый коэффициент выявлен только для енисейского климатипа, что свидетельствует о длительном формировании поздней древесины у этого климатипа в лесостепи.

Для чемальского климатипа из лесостепной зоны Алтая наибольший коэффициент корреляции отмечается с суммой осадков с июля по август ($r = 0,55$; $p < 0,01$), как и у сузунского из лесостепи Западной Сибири ($r = 0,49$; $p < 0,05$). Плесецкий климатип из средней тайги Европейского Севера имеет

корреляцию с суммой осадков с июля по сентябрь ($r = 0,37$; $p < 0,05$), богучанский из южной тайги – с суммой осадков июля и сентября ($r = 0,47$; $p < 0,05$).

У богучанского климатипа в лесостепи основную роль в ШГК играют осадки июня, в этот месяц происходит развитие радиальных диаметров ранних трахеид, поздних – в июле [1], поэтому доля поздней древесины у богучанского климатипа в лесостепи ниже, чем у остальных климатипов, у которых основное влияние на ШГК оказывают осадки июля.

Заключение

Среднее значение ширины годичного кольца (ШГК) у климатипов с юга Сибири и енисейского из южной тайги Красноярского края в условиях географических культур в лесостепи достоверно меньше, чем в южной тайге. Увеличение ШГК в южной тайге происходит за счет ранней древесины, поэтому ДП в условиях южной тайги у всех исследуемых климатипов меньше, чем в лесостепи. Причина этих различий – климатические условия лесостепи, которые являются более сухими в течение вегетационного периода из-за более высоких среднесуточных температур.

ШГК климатипов, перемещенных из более теплого климата в южную тайгу, превышает или достигает ШГК контрольного климатипа и отличается от северных, в том числе и самого северного плесецкого, имеющего самые низкие значения за многолетний период. В южной тайге ШГК северных климатипов имеют меньшие значения по сравнению с контролем, причиной является медленный характер роста, который наследуется в условиях южной тайги.

В условиях южной тайги доля поздней древесины (ДП) у всех климатипов сосны уменьшается относительно лесостепи в связи с адаптацией к более влажным условиям, при которых дефицит влаги, стимулирующий у деревьев переход к формированию поздних трахеид, наступает в южной тайге позднее. Наибольшими значениями ДП в южной тайге и лесостепи отличается балгазынский климатип, что свидетельствует о его наследственной реакции, способствующей раннему формированию поздней древесины по сравнению с остальными.

Реакция ШГК климатипов сосны на погодные условия в лесостепи и южной тайге различается. В лесостепи из-за дефицита влаги влияние среднемесячной температуры на ШГК в течение вегетационного периода отрицательное, в южной тайге (как в начале, так и в конце вегетационного периода) – положительное. В лесостепи у южных климатипов проявляется положительное влияние осадков июля, у северных – первых месяцев вегетации (апреля–июня). В южной тайге влияние количества осадков июня и июля на ШГК выявлено у всех климатипов, что свидетельствует об эффективном использовании влаги в течение более длительного времени по сравнению с лесостепью.

Реакция на погодные условия вегетационного периода у климатипов по ДП более сложная и разнообразная, так как связана с комплексным влиянием погоды всего сезона на этот показатель: отрицательная связь с количеством осадков и положительная с температурой в начале вегетационного периода; отрицательная с температурой и положительная с количеством осадков во второй половине вегетационного периода. В южной тайге значимые корреляционные связи по отдельным месяцам отмечаются только во второй половине

вегетационного периода, в лесостепи – как в первой, так и во второй его половине. Часть климатипов имеют схожие корреляционные связи, что говорит об их относительно одинаковой норме реакции, выравненной дефицитом влаги в географических культурах в лесостепи. По формированию ШГК и ДП у исследуемых климатипов сосны в условиях географических культур для лесостепи и южной тайги наиболее генетически стабильным является богучанский климатип.

Полученные результаты исследований могут использоваться при отборе перспективных климатипов для создания лесных культур и плантаций в соответствующих лесорастительных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антонова Г.Ф. Рост клеток хвойных. Новосибирск: Наука, 1999. 232 с. [Antonova G.F. *Cell Growth in Conifers*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 232 p.]
2. Прошников А.И. Географические культуры хвойных в южной Сибири // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. М.: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 4–110. [Iroshnikov A.I. Provenance Trials of Conifers in Southern Siberia. *Provenance Trials and Coniferous Plantations in Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, pp. 4–110].
3. Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А. Морфологические особенности хвои у сосны обыкновенной с разной устойчивостью к грибным болезням // Экология. 2015. № 2. С. 156–160. [Kuzmin S.R., Kuzmina N.A. Morphological Distinctions of Needles in Scots Pine with Various Resistance Levels to Fungal Diseases. *Ekologia* [Russian Journal of Ecology], 2015, no. 2, pp. 156–160]. DOI: [10.7868/S0367059715010084](https://doi.org/10.7868/S0367059715010084)
4. Кузьмин С.Р., Роговцев Р.В. Радиальный рост и доля поздней древесины у сосны обыкновенной в географических культурах Западной и Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2016. № 6. С. 113–125. [Kuzmin S.R., Rogovtsev R.V. Radial Growth and Percent of Latewood in Scots Pine Provenance Trials in Western and Central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 6, pp. 113–125]. DOI: [10.15372/SJFS20160611](https://doi.org/10.15372/SJFS20160611)
5. Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А., Ваганов Е.А. Динамика роста сосны обыкновенной в географических культурах // Лесоведение. 2013. № 1. С. 30–38. [Kuzmin S.R., Kuzmina N.A., Vaganov E.A. Growth Dynamics of Scots Pine in Provenance Trial Plantations. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2013, no. 1, pp. 30–38].
6. Кузьмин С.Р., Ваганов Е.А., Кузьмина Н.А., Милютин Л.И. Особенности трахеид древесины у климатипов *Pinus sylvestris* L. (*Pinaceae*) в географических культурах // Ботан. журн. 2008. Т. 93, № 1. С. 10–21. [Kuz'min S.R., Vaganov E.A., Kuz'mina N.A., Milyutin L.I. Specificity of Wood Tracheids of *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) Climatypes in the Provenance Trial. *Botanicheskii Zhurnal*, 2008, vol. 93, no. 1, pp. 10–21].
7. Кузьмин С.Р., Ваганов Е.А., Кузьмина Н.А., Милютин Л.И., Силкин П.П. Плотность устьиц хвои сосны обыкновенной в географических культурах Приангарья // Лесоведение. 2009. № 2. С. 35–40. [Kuz'min S.R., Vaganov E.A., Kuz'mina N.A., Milyutin L.I., Silkin P.P. Density of Needle Stomata in Different Scots Pine Provenances in Provenance Trials (the Angara River Basin). *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2009, no. 2, pp. 35–40].
8. Кузьмина Н.А., Кузьмин С.Р. Устойчивость сосны обыкновенной разного происхождения к грибным патогенам в географических культурах Приангарья // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 4–5. С. 454–461. [Kuzmina N.A., Kuzmin S.R. Resistance of Pine of Different Origin to Pathogenic Fungus in Geographical Cultures of Priangariye. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2007, vol. 24, no. 4-5, pp. 454–461].

9. Мельник П.Г., Мерзленко М.Д. Результат выращивания климатипов сосны в географических культурах северо-восточного Подмосковья // Лесотехн. журн. 2014. № 4. С. 36–44. [Mel'nik P.G., Merzlenko M.D. The Result of Scots Pine Climatic Provenances Growth in the Geographical Plantations of the North-East of the Moscow Region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, no. 4, pp. 36–44]. DOI: [10.12737/8438](https://doi.org/10.12737/8438)

10. Мельник П.Г., Глазунов Ю.Б., Мерзленко М.Д. Рост и производительность архангельского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмосковья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 1. С. 9–20. [Mel'nik P.G., Glazunov Yu.B., Merzlenko M.D. The Growth and Productive Capacity of the Arkhangelsk Climatype of Scots Pine in the Moscow Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 9–20]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.1.9](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.9), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f25/melnik.pdf>

11. Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Мельник П.Г. Результаты выращивания провениенций сосны обыкновенной в географических посадках Серебряноборского опытного лесничества // Лесоведение. 2017. № 3. С. 176–182. [Merzlenko M.D., Glazunov Y.B., Mel'nik P.G. Growing Geographic Trial Provenances of the Scots Pine in Serebryany Bor Forestry. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2017, no. 3, pp. 176–182].

12. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Чупров А.В., Беляев В.В. Реакция роста сосны обыкновенной на климатические изменения в широтном градиенте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 82–93. [Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Chuprov A.V., Belyaev V.V. Growth Response of Scots Pine to Climate Change in the Latitudinal Gradient. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 82–93]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.5.82](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.82), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/418/82_93.pdf

13. Наквасина Е.Н., Юдина О.А., Прожерина Н.А., Камалова И.И., Минин Н.С. Географические культуры в ген-экологических исследованиях на Европейском Севере. Архангельск: АГТУ, 2008. 308 с. [Nakvasina E.N., Yudina O.A., Prozherina N.A., Kamalova I.I., Minin N.S. *Provenance Trials in Gene-Ecological Research in the European North*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 308 p.]

14. Наумова Н.Б., Макарикова Р.П., Тараканов В.В., Кузьмина Н.А., Новикова Т.Н., Милютин Л.И. Влияние климатипов сосны обыкновенной на некоторые химические и микробиологические свойства почв // Сиб. экол. журн. 2009. Т. 16, № 2. С. 287–292. [Naumova N.B., Makarikova R.P., Tarakanov V.V., Kuz'mina N.A., Novikova T.N., Milyutin L.I. Influence of Climatotypes of Scots Pine on Certain Chemical and Microbiological Characteristics of Soils. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2009, vol. 16, no. 2, pp. 287–292]. DOI: [10.1134/S1995425509020106](https://doi.org/10.1134/S1995425509020106)

15. Пахарькова Н.В., Кузьмина Н.А., Кузьмин С.Р., Ефремов А.А. Морфофизиологические особенности хвои у разных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 1. С. 107–113. [Pakharkova N.V., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Efremov A.A. Morphophysiological Traits of Needles in Different Climatotypes of Scots Pine in Provenance Trial. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2014, vol. 21, no. 1, pp. 107–113]. DOI: [10.1134/S1995425514010107](https://doi.org/10.1134/S1995425514010107)

16. Правдин Л.Ф., Вакуров А.Д. Рост сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) разного географического происхождения в подзоне хвойно-широколиственных лесов // Сложные боры хвойно-широколиственных лесов и пути ведения лесного хозяйства в лесопарковых условиях Подмосковья. М.: Наука, 1968. С. 160–195. [Pravdin L.F., Vakurov A.D. Growth of Scots Pine (*Pinus silvestris* L.) of Various Geographical Origin in the Subzone of Coniferous Broad-Leaved Forests. *Multi-Storeyed Woods of Coniferous Broad-Leaved Forests and Ways of Forest Management in the Forest-Park Conditions of Podmoskovye*. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 160–195].

17. Роговцев Р.В., Богун И.А. Географические культуры сосны обыкновенной в Новосибирской области // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 3, № 2. С. 295–302. [Rogovtsev R.V., Bohun I.A. The Geographical Cultures of the Common Pine in the Novosibirsk Region. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 295–302].

18. Савва Ю.В. Рост и структура годичных колец сосны обыкновенной в географических культурах Средней Сибири в зависимости от климатических факторов: дис. ... канд. биол. наук. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2001. 142 с. [Savva Yu.V. Scots Pine Tree Ring Growth and Structure in Provenance Trials of Central Siberia in Dependence to Climatic Factors: Cand. Biol. Sci. Diss. Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest SB RAS, 2001. 142 p.]

19. Савва Ю.В., Ваганов Е.А., Милютин Л.И. Влияние климатических условий Красноярской лесостепи на рост и структуру годичных колец сосны в условиях географических культур // Лесоведение. 2003. № 3. С. 3–14. [Savva Yu.V., Vaganov E.A., Milyutin L.I. Influence of Climatic Changes on Annual Ring Growth and Structure in Scots Pine Trees of Provenances in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2003, no. 3, pp. 3–14].

20. Справочник по климату СССР. Вып. 01. Архангельская и Вологодская области, Карельская и Коми АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 360 с. [*Handbook on the Climate of the USSR. Iss. 01. Arkhangelsk and Vologda Regions, Karelian and Komi ASSRs. Part 2. Air and Soil Temperature.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968. 360 p.]

21. Справочник по климату СССР. Вып. 01. Архангельская и Вологодская области, Карельская и Коми АССР. Ч. 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 348 с. [*Handbook on the Climate of the USSR. Iss. 01. Arkhangelsk and Vologda Regions, Karelian and Komi ASSRs. Part 4. Air Humidity, Precipitation, Snow Cover.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968. 348 p.]

22. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области и Алтайский край. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 398 с. [*Handbook on the Climate of the USSR. Iss. 20. Tomsk, Novosibirsk and Kemerovo Regions and Altayskiy Krai. Part 2. Air and Soil Temperature.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965. 398 p.]

23. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области и Алтайский край. Ч. 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 333 с. [*Handbook on the Climate of the USSR. Iss. 20. Tomsk, Novosibirsk and Kemerovo Regions and Altayskiy Krai. Part 4. Air Humidity, Precipitation and Snow Cover.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 333 p.]

24. Справочник по климату СССР. Вып. 21. Красноярский край и Тувинская АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 507 с. [*Handbook on the Climate of the USSR. Iss. 21. Krasnoyarsk Krai and Tuvan ASSR. Part 2. Air and Soil Temperature.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967. 507 p.]

25. Справочник по климату СССР. Вып. 21. Красноярский край и Тувинская АССР. Ч. 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 403 с. [*Handbook on the Climate of the USSR. Iss. 21. Krasnoyarsk Krai and Tuvan ASSR. Part 4. Air Humidity, Precipitation and Snow Cover.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 403 p.]

26. Тараканов В.В., Демиденко В.П., Ишутин Я.Н., Бушков Н.Т. Селекционное семеноводство сосны обыкновенной в Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2001. 230 с. [Tarakanov V.V., Demidenko V.P., Ishutin Ya.N., Bushkov N.T. *Scots Pine Selective Breeding in Siberia.* Novosibirsk, Nauka Publ., 2001. 230 p.]

27. Тимофеев В.П. Особенности роста сосны различного происхождения в Лесной опытной даче Тимирязевской академии // Изв. ТСХА. 1973. Вып. 2. С. 130–146. [Timofeyev V.P. Growth Features of Scots Pine of Different Origin in the Forest Experimental Dacha of the Timiryazev Academy. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy], 1973, iss. 2, pp. 130–146.]

28. Чернодубов А.И., Галдина Т.Е., Смогунова О.А. Географические культуры сосны обыкновенной на юге Русской равнины. Воронеж: ВГЛТА, 2005. 128 с. [Chernodubov A.I., Galdina T.E., Smogunova O.A. *Scots Pine Provenance Trials in the South of the Russian Plane.* Voronezh, VGLTA Publ., 2005. 128 p.]

29. Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Barring L., Andersson Gull B. Scots Pine Transfer Effect Models for Growth and Survival in Sweden and Finland. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 3, art. 1562. DOI: [10.14214/sf.1562](https://doi.org/10.14214/sf.1562)

30. Bryukhanova M., Fonti P. Xylem Plasticity Allows Rapid Hydraulic Adjustment to Annual Climatic Variability. *Trees*, 2013, vol. 27, pp. 485–496. DOI: [10.1007/s00468-012-0802-8](https://doi.org/10.1007/s00468-012-0802-8)

31. DeSoto L., De la Cruz M., Fonti P. Intra-Annual Patterns of Tracheid Size in the Mediterranean Tree *Juniperus thurifera* as an Indicator of Seasonal Water Stress. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, vol. 41, no. 6, pp. 1280–1294. DOI: [10.1139/x11-045](https://doi.org/10.1139/x11-045)

32. Eilmann B., Rigling A. Tree-Growth Analyses to Estimate Tree Species' Drought Tolerance. *Tree Physiology*, 2012, vol. 32, iss. 2, pp. 178–187. DOI: [10.1093/treephys/tps004](https://doi.org/10.1093/treephys/tps004)

33. *European Climate Assessment & Dataset Project (ECA&D)*. Available at: <https://www.ecad.eu> (accessed 20.09.17).

34. Fajstavr M., Bednářová E., Nezval O., Giagli K., Gryc V., Vavrčík H., Horáček P., Urban J. How Needle Phenology Indicates the Changes of Xylem Cell Formation during Drought Stress in *Pinus sylvestris* L. *Dendrochronologia*, 2019, vol. 56, art. 125600. DOI: [10.1016/j.dendro.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.05.004)

35. Fajstavr M., Paschová Z., Giagli K., Vavrčík H., Gryc V., Urban J. Auxin (IAA) and Soluble Carbohydrate Seasonal Dynamics Monitored During Xylogenesis and Phloemogenesis in Scots Pine. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2018, vol. 11, iss. 5, pp. 553–562. DOI: [10.3832/ifer2734-011](https://doi.org/10.3832/ifer2734-011)

36. Funada R., Kubo T., Tabuchi M., Sugiyama T., Fushitani M. Seasonal Variations in Endogenous Indole-3-Acetic Acid and Abscisic Acid in the Cambial Region of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. Stems in Relation to Earlywood-Latewood Transition and Cessation of Tracheid Production. *Holzforschung*, 2001, vol. 55, iss. 2, pp. 128–134. DOI: [10.1515/HF.2001.021](https://doi.org/10.1515/HF.2001.021)

37. George J.-P., Schueler S., Karanitsch-Ackerl S., Mayer K., Klumpp R.T., Grabner M. Inter- and Intra-Specific Variation in Drought Sensitivity in *Abies spec.* and Its Relation to Wood Density and Growth Traits. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, vol. 214–215, pp. 430–443. DOI: [10.1016/j.agrformet.2015.08.268](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.268)

38. Liang W., Heinrich I., Simard S., Helle G., Liñán I.D., Heinken T. Climate Signals Derived from Cell Anatomy of Scots Pine in NE Germany. *Tree Physiology*, 2013, vol. 33, iss. 8, pp. 833–844. DOI: [10.1093/treephys/tpt059](https://doi.org/10.1093/treephys/tpt059)

39. Matisons R., Jansone D., Elferts D., Adamovičs A., Schneck V., Jansons Ā. Plasticity of Response of Tree-Ring Width of Scots Pine Provenances to Weather Extremes in Latvia. *Dendrochronologia*, 2019, vol. 54, pp. 1–10. DOI: [10.1016/j.dendro.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.01.002)

40. Matyas C. Genetic and Ecological Constraints of Adaptation. *Forest Genetics, Breeding and Physiology of Woody Plants: Proceedings of the IUFRO International Symposium, Voronezh, USSR, September 24–30, 1989*. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 79–90.

41. Oleksyn J., Tjoelker M.G., Reich P.B. Growth and Biomass Partitioning of Populations of European *Pinus sylvestris* L. under Simulated 50° and 60° N Daylengths: Evidence for Photoperiodic Ecotypes. *New Phytologist*, 1992, vol. 120, iss. 4, pp. 561–574. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1992.tb01806.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01806.x)

42. Park Y., Spiecker H. Variations in the Tree-Ring Structure of Norway Spruce (*Picea abies*) under Contrasting Climates. *Dendrochronologia*, 2005, vol. 23, iss. 2, pp. 93–104. DOI: [10.1016/j.dendro.2005.09.002](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.09.002)

43. Persson B., Ståhl E.G. Survival and Yield of *Pinus sylvestris* L. as Related to Provenance Transfer and Spacing at High Altitudes in Northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1990, vol. 5, iss. 1-4, pp. 381–395. DOI: [10.1080/02827589009382621](https://doi.org/10.1080/02827589009382621)

44. Pukkala T. Transfer and Response Functions as a Means to Predict the Effect of Climate Change on Timber Supply. *Forestry*, 2017, vol. 90, iss. 4, pp. 573–580. DOI: [10.1093/forestry/cpx017](https://doi.org/10.1093/forestry/cpx017)

45. Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Parfenova Y.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific Responses to Climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 2002, vol. 8, iss. 9, pp. 912–929. DOI: [10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x)

46. Savva Y., Koubaa A., Tremblay F., Bergeron Y. Effects of Radial Growth, Tree Age, Climate, and Seed Origin on Wood Density of Diverse Jack Pine Populations. *Trees*, 2010, vol. 24, pp. 53–65. DOI: [10.1007/s00468-009-0378-0](https://doi.org/10.1007/s00468-009-0378-0)

47. Taeger S., Fussi B., Konnerth M., Menzel A. Large-Scale Genetic Structure and Drought-Induced Effects on European Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings. *European Journal of Forest Research*, 2013, vol. 132, pp. 481–496. DOI: [10.1007/s10342-013-0689-y](https://doi.org/10.1007/s10342-013-0689-y)

48. Uggla C., Magel E., Moritz T., Sundberg B. Function and Dynamics of Auxin and Carbohydrates During Earlywood/Latewood Transition in Scots Pine. *Plant Physiology*, 2001, vol. 125, pp. 2029–2039. DOI: [10.1104/pp.125.4.2029](https://doi.org/10.1104/pp.125.4.2029)

RESPONSE OF ANNUAL RING WIDTH AND LATEWOOD CONTENT OF SCOTS PINE TO WEATHER CONDITIONS IN PROVENANCE TRIALS

S.R. Kuzmin^{1,2}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist; ResearcherID: [T-6977-2019](https://orcid.org/0000-0002-5391-6536), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5391-6536>

¹V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Akademgorodok, 50, str. 28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: skr_7@mail.ru

²Siberian Federal University, prosp. Svobodnyy, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; e-mail: srkuzmin@sfu-kras.ru

Tree-ring width and latewood content were studied to assess the response of wood to growing conditions. Samples were taken from the trees of six Scots pine climatotypes with contrast origin, grown in the conditions of provenance trials in southern taiga of Central Siberia (Boguchany forestry) and forest-steppe of Western Siberia (Suzun forestry). A comparative analysis of variance of mean values of the studied features between the climatotypes within each test point and between the points is carried out. Correlation analysis was used to analyze the dynamics of the studied traits and as their response to weather conditions over a long period. It was revealed that in the forest-steppe conditions maximal radial increments for all climatotypes were observed on average at the age of 9 and in southern taiga at the age of 12–16. Tree-ring width of the climatotypes from the south is significantly lower in the forest-steppe conditions than that of the representatives of northern origin. Climatotypes transferred from a warmer climate to southern taiga are characterized by significantly larger values of tree-ring width than in the northernmost of the studied ones. The latewood content decreases in all studied climatotypes of pine in southern taiga in comparison with forest-steppe. Significant response of the latewood content of climatotypes in forest-steppe is observed not only with average monthly weather conditions of the second part of vegetation period but also with the first. It indicates a higher sensitivity of their wood structure to the complex of climatic and ecological conditions in the provenance trials of forest-steppe compared with southern taiga. The research results show that the Boguchany climatotype is genetically stable in terms of the average values of tree-ring width and latewood content in forest-steppe and southern taiga.

For citation: Kuzmin S.R. Response of Annual Ring Width and Latewood Content of Scots Pine to Weather Conditions in Provenance Trials. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 64–80. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-5-64-80](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-64-80)

Funding: The research was carried out within the framework of fundamental scientific research through the programs of the Russian Academy of Sciences No. 0356-2019-0024 (Biodiversity of Indigenous Coniferous and Induced Forest Ecosystems) as well as with partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research projects (No. 14-04-31366; No. 20-05-00540).

Acknowledgements: The author is grateful to R.V. Rogovtsev (Head of the Novosibirsk Forest Seed Department of the Centre of Forest Health of Novosibirsk Region – Branch of Russian the Centre of Forest Health) for his assistance in the field work.

Keywords: provenance trials, Scots pine, tree-ring width, latewood content.

Поступила 11.07.19 / Received on July 11, 2019

УДК 630*232.32+630*811.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-81-89

**THE EFFECTIVENESS OF LOW FREQUENCY
ELECTROMAGNETIC FIELD AND HYDROGEL INFLUENCE ON
SURVIVAL RATE AND GROWTH OF RED OAK (*Quercus rubra* L.)
ANNUAL SEEDLINGS**

A.I. Smirnov¹, *Candidate of Agriculture*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9530-6210>

F.S. Orlov¹, *Candidate of Agriculture*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8772-4428>

P.A. Aksenov², *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [H-1352-2019](https://orcid.org/0000-0002-1716-7726),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1716-7726>

Yu.V. Yaskov³, *Director of Donskoy Leskhoz*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2140-9169>

¹ООО «Разносervis», Likhov per., 10, Moscow, 127051, Russian Federation;

e-mail: 364-27-37@mail.ru, ap-6@yandex.ru

²Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: axenov.pa@mail.ru, forestmaster@yandex.ru

³GAU «Donskoy Leskhoz», Forestry Department of the Lipetsk Region, ul. Mira, 19, s. Donskoye, Zadonskiy District, Lipetsk Region, 99240, Russian Federation;

e-mail: forester48@mail.ru

This work presents the results of a research that was conducted in the Donskoy Leskhoz nursery of the Forestry Department of the Lipetsk Region. The purpose of the research is to determine the effectiveness of the influence of a low-frequency electromagnetic field and the hydrogel “Evabiona” on the survival rate of red oak annual seedlings grown in open ground of the nursery. This research presents the technology for creating red oak planting material with increased survival indices of test samples and their biometric parameters: seedling height, seedling diameter at a root collar, weight of roots and aboveground part in the air-dry condition after drying for 15 days. Treatment of red oak one-year old seedlings with a low frequency electromagnetic field was carried out according to the author’s technology POSEP – pre-sowing treatment of seeds and seedlings with an electromagnetic field. The hydrogel, a polymer water-retaining agent that absorbs and retains a large amount of moisture in the rhizosphere of plants, was applied to soil in the experimental research. The ability of the hydrogel granules to swell-compression improves the structure and drainage of soils, boosting the conditions of aeration and filtration of water, and maintains its water-retaining properties for several years. The research results indicate a clear positive effect of treatment with a low-frequency electromagnetic field and the hydrogel, as there was a significant increase in the survival rate of the test samples of oak seedlings in relation to the control samples. Also within the framework of the research a comparative histometric analysis of cross sections of control and test stems of oak seedlings was carried out late in the growing season at the laboratory of the Department of Forest Crops, Selection and Dendrology of the Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University. The results of this research showed that a low-frequency electromagnetic field and the hydrogel can influence on the anatomical structure of seedlings, improving their quality characteristics. Thus, pre-sowing treatment of oak seedlings with a low-frequency electromagnetic field and the use of the hydrogel showed the effectiveness of these techniques in increasing the survival rate of seedlings and obtaining high-quality planting material of red oak in forest nurseries.

For citation: Smirnov A.I., Orlov F.S., Aksenov P.A., Yaskov Yu.V. The Effectiveness of Low Frequency Electromagnetic Field and Hydrogel Influence on Survival Rate and Growth of Red Oak (*Quercus rubra* L.) Annual Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 81–89. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-81-89

Keywords: low frequency EMF, POSEP technology, hydrogel, red oak seedlings, histometric analysis.

Introduction

Oak forests of our country are an important component of natural ecosystems. However, due to the large anthropogenic load on the forests in the Central region of the European part of Russia, the area of oak plantations has been greatly reduced. According to experts, this problem can be solved by introducing new, fast-growing and economically valuable introduced species into the process of artificial reforestation of broad-leaved species. They include red oak (*Quercus rubra* L.), natural habitat of which are broad-leaved forests of North America [1]. Red oak is most prevalent of all introduced hardwood species in the European part of Russia. Although it is inferior in wood quality to pedunculate oak (*Quercus robur* L.), but still it has a number of advantages. It is known that red oak is moderately photophilous, undemanding to soil, quite hardy, resistant to powdery mildew, not damaged by the green oak moth (*Tortrix viridana*), has soil-improving properties and grows by 10–50 % faster than pedunculate oak (*Quercus robur* L.). The age of the main felling of red oak stands can be reduced by 1.5 times, relative to pedunculate oak (*Quercus robur* L.) [8]. Due to its unique decorative properties, red oak is widely used in landscape design [5]. These qualities of red oak make it a promising forest-forming species in the zone of coniferous broad-leaved forests. Therefore, studies of this tree species are relevant nowadays. The use of an electromagnetic field (EMF) and the hydrogel Evabiona for growing high-quality planting material is a little studied area in the Russian forestry sector. Although in forest seed production, we have used the treatment of coniferous seeds, and later seedlings, with EMF since 2012. As a result of the studies, carried out both in laboratories and in forest nurseries, a simple and environmentally friendly technology of pre-sowing treatment of seeds and seedlings with an electromagnetic field (POSEP) [11] was developed and the “Rost-Aktiv” device (a low-frequency EMF generator) was created [4, 6, 10, 13].

Hydrogel is a polymer water-retaining agent that is introduced into the soil, absorbs and retains water and dissolved nutrients. It was also used in the research. Hydrogel tends to easily release the accumulated water, gradually providing it to plants. When properly applied, it retains fertilizers, keeping them in an accessible zone for plant roots, improves the water-physical soil properties [2, 17] and provides the most favorable conditions for growth and development of tree species in the first years after planting [18]. Further study (2013–2019) of the influence of a low-frequency EMF and the hydrogel included treatment of seeds and growing seedlings of coniferous species in forest nurseries (Scots pine and Norway spruce). The results of these studies indicate the effectiveness of the POSEP technology and the use of the hydrogel in the treatment of both seeds and seedlings of the main forest-forming species [14, 20]. The presented work is interesting by the reason that such experiments have not been carried out on seedlings of deciduous tree species before.

Research objects and methods

The research was carried out in the Donskoy Leskhoz nursery of the Forestry Department of the Lipetsk Region in 2019. Bareroot annual seedlings of red oak were the research object. In April 2019 control and experiment plantings of red oak seedlings were laid out on a plot of 150 linm of a planting bed in order to study the effect of a low-frequency EMF and the hydrogel on their survival rate. Three seedling options were compared: Control – untreated seedlings, 50 pcs; Experiment 1 – seedlings treated with EMF, 50 pcs; Experiment 2 – seedlings treated with EMF and the hydrogel, 50 pcs.

Seedlings for Experiments 1 and 2 were treated using the POSEP technology with the low frequency generator “Rost-Aktiv” (frequency – 16 Hz; increasing magnetic field induction value from 0.4 to 2.0 mT; exposure – 11 min) according to the research procedure before planting in holes [3, 7, 12, 16]. Seedlings were planted using the Kolesov’s planting iron with a planting step of 1 m. In Experiment 2, the planting holes were pre-treated with the hydrogel swollen in water (at a rate of 2 g of the dry hydrogel per hole), after that seedlings treated with EMF were planted. At the end of September 2019, we made records on the seedlings established in the experimental and control areas and carried out biometric measurements of them (fig. 1).



Fig. 1. Records on the seedlings from left to right: Control, Experiment 2 and Experiment 1

At the same time, Control and Experiment seedlings were lifted with maximum integrity of the root system for in-depth studies in the laboratory of the Department of Forest Crops, Selection and Dendrology of the Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University. The following biometric parameters were measured: seedling height, seedling diameter at a root collar, roots weight and the aboveground part in the air-dry condition after drying for 15 days. The scales Acom JW1 were used to determine the average weight of seedling parts.

The following technique was used for the histometric analysis of cross sections: 1–2 cm sections of stems with root collars were cut from the seedlings, and then they were exposed to the action of a softening alcohol-glycerine mixture (component ratio 1:1) for 10 days at a temperature of 25–30 °C. Later on, cross sections were obtained using MS-2 microtome and stained in accordance with the standard method [15]. Temporary glycerine preparations were produced in accordance with the procedure described in reference [19]. Microscopy was carried out in the direct light-field and polarization modes using a research biological microscope

Jenaval (Carl Zeiss) equipped with an eyepiece micrometer and polarizers. The following microlenses were used: GF-Plan 3.2/0.06/∞/-; GF-Plan 12.5/0.25/∞/-; GF-Plan 25/0.5/∞/0.17; GF-Plan 40/0.65/∞/0.17; GF-Plan HI 100/1.25/160/0.17. Images of wood cross sections were obtained using photomicrographic attachment.

To verify the reliability of the results obtained, we followed standard methods of statistical processing [9] and used Microsoft Excel software.

Research results and discussion

An analysis of the survival rate of seedlings in autumn 2019 showed a significant superiority of Experiment options over the Control (table 1).

Table 1

Characteristics of the survival rate of red oak seedlings treated with EMF and the hydrogel

No.	Experiment options	Number of recorded seedlings during planting	Number of established seedlings (recorded in September, 2019)	Survival rate, %, ±error of the proportion, %
1	Control	50	14	28±6.4
2	Experiment 1	50	24	48±7.1
3	Experiment 2	50	32	64±6.8

The results of studying the effect of EMF and the hydrogel on the survival rate of red oak seedlings grown in open ground of the nursery in the dry summer of 2019 show that the best option is the treatment with EMF and the hydrogel during planting (table 1). The observed difference can be explained by the stimulating effect of EMF with the joint long-term protective action of the hydrogel on the subsequent rhizogenesis after transplantation and absorption of solutions by roots in the post-stress period. Also, the treatment with EMF and the hydrogel had an impact on the biometric parameters of oak seedlings (table 2).

Table 2

Average biometric parameters of oak seedlings treated with EMF and the hydrogel (sampling size – 20 pcs; $\alpha = 0.05$; $t_{st} = 2.024$)

No.	Experiment options	Seedling height, cm ($M \pm m_M$)	Root collar diameter, mm ($M \pm m_M$)	Roots mass, g ($M \pm m_M$)	Trunks mass, g ($M \pm m_M$)
1	Control	12.5±0.49	4.0±0.09	4.2±0.22	1.24±0.03
	% of control	100	100	100	100
2	Experiment 1	14.5±0.42	5.5±0.22	11.9±0.39	3.29±0.10
	% of control	116	137	283	265
	$t_{calculated}$	3.10	6.31	17.20	19.64
3	Experiment 2	21.0±0.54	4.5±0.16	9.57±0.34	3.89±0.25
	% of control	168	112	227	313
	$t_{calculated}$	11.66	2.72	13.27	10.52

Based on the results of autumn calculations, the average biometric parameters of red oak seedlings were compared in all experiment options: Experiment 1; Experiment 2; Control. The data in table 2 indicate that the treatment of seedlings in Experiment 2 exceeded Control by every measure, so height of the Experiment samples exceeded the Control by 68 %. This is a substantial difference considering

that the seedlings were grown in open ground without watering and care. Also, at the end of the growing season, a comparative histometric analysis of cross sections of the Control and Experiment stems of oak seedlings was carried out in the laboratory of the Department of Forest Crops, Selection and Dendrology of the Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University. The results of this study are shown in table 3.

Table 3

Average histometric parameters of oak seedlings treated with EMF and the hydrogel (sampling size – 10 pcs; $\alpha = 0.05$; $t_{st} = 2.1$)

No.	Experiment options	Core diameter, mm ($M \pm m_M$)	Xylem ring width, mm ($M \pm m_M$)	Secondary wood vessels diameter, μm ($M \pm m_M$)
1	Control	1.51 \pm 0.087	0.86 \pm 0.034	18.7 \pm 0.91
	% of control	100	100	100
2	Experiment 1	1.79 \pm 0.122	1.43 \pm 0.074	19.6 \pm 0.99
	% of control	118	166	105
	$t_{calculated}$	1.87	6.99	0.67
3	Experiment 2	1.55 \pm 0.065	1.31 \pm 0.069	21.7 \pm 1.08
	% of control	103	152	116
	$t_{calculated}$	0.37	5.85	2.12

According to table 3 we made conclusions. The size of the core of the compared groups in the Experimental options exceeds the Control. The total xylem ring width in Experiments 1 and 2 significantly exceeds the Control width. The wood radial growth at the level of a root collar has the maximum values in Experiment 1. When comparing the average diameters of the secondary xylem vessels in different options of the experiment, there is a tendency to increase the average diameter of the vessel segment in the series Control – Experiment 1 – Experiment 2.

Comparative anatomical study of seedlings from three options of the experiment revealed the features of the stem structure at the level of the root collar according to the study of cross sections.

In general, the secondary xylem in all considered experiment options has common juvenile features. It is particularly worth noting the high degree of parenchyma formation on the last radial increment of seedlings. It is represented by both multiple single-row wood rays, and a high content of metatracheal starch-bearing parenchyma (fig. 2).

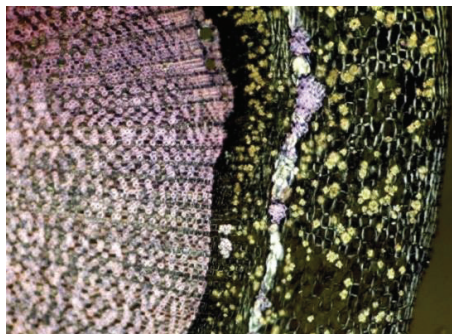


Fig. 2. Cross section of oak seedling in experiment 2 in the mode of crossed Nichols (microlens GF-Plan 12.5/0.25/ ∞ /-)

The zone of highly parenchymatized wood is on the right. Multiple oxalate crystals and a solid light fiber (a glued ring) are observed in the cortical ring (fig. 2).

The core of all options contains a fair amount of small starch grains. There is a tendency to an increase in the occurrence of starch in the core cells in the Experiment options compared with the Control (fig. 3).

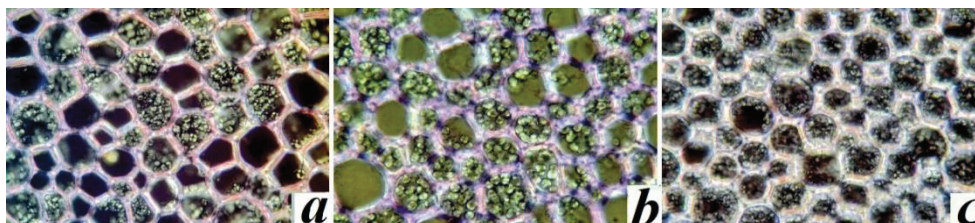


Fig. 3. Cross sections of the core of oak seedlings in the mode of partially crossed Nichols (microlens GF-Plan 40/0.65/∞/0.17): *a* – Control; *b* – Experiment 1; *c* – Experiment 2

The width of the secondary xylem layer is much larger in the options with EMF treatment. There is a high degree of order in radial chains of vessel lumen with an increase in the annual ring (fig. 4).



Fig. 4. Cross sections of oak seedling stems at one magnification (microlens GF-Plan 3.2/0.06/∞/-, gentian violet staining): *a* – Control; *b* – Experiment 1; *c* – Experiment 2

The bark width is also of great importance in plants treated with EMF. This preserves the integrity of the bark inner ring formed by alternating sections of primary bast fibers and clusters of stone cells. The bulk of the primary cortex is a thin-walled parenchyma containing a large number of small druses and single crystals of calcium oxalate, well detected in the polarization mode (fig. 2). Aggregate rays, as a rule, end in the bark with the formation of large zones of sclerification and calcification.

Conclusion

The survival rate and growth of red oak seedlings in the selected area of the Donskoy Leskhoz nursery of the Forestry Department of the Lipetsk Region were evaluated as a result of the research. At the end of the growing season during the autumn records it was found that oak seedlings treated with EMF and planted in planting holes with the introduction of the hydrogel swollen in water have shown the best results in the survival rate and growth. It should also be noted that the treatment with EMF and the hydrogel had a positive effect on the internal structure of seedlings. This can improve the wood quality. Thus, the treatment of seedlings with a low-frequency EMF in combination with the use of the hydrogel promote the production of planting material with better parameters that will undoubtedly give a positive economic effect.

Based on the research results, it is possible to assume the feasibility of processing the red oak planting material with a low-frequency EMF and the hydrogel in the creation of crops. And the use of hydrogels in forest management of the Russian Federation can be attributed to the number of promising reclamation measures in creation of artificial forest plantations.

REFERENCES

1. Бульгин Н.Е., Ярмишко В.Т. Дендрология. М.: МГУЛ. 2001. 528 с. [Bulygin N.E., Yarmishko V.T. *Dendrology*. Moscow, MGUL Publ., 2001. 528 p.].
2. Данилова Т.Н., Козырева Л.В. Возможности использования гидрогелей для управления водообеспеченностью полей // Плодородие. 2008. № 6. С. 24–25. [Danilova T.N., Kozyreva L.V. The Possibility of Hydrogel Application for Management of Field Water Supply. *Plodородie*, 2008, no. 6, pp. 24–25].
3. Кораблев Р.А. Влияние физических факторов на свойства семян и рост сеянцев сосны обыкновенной и березы повислой: дис. ... канд. с.-х. наук. Воронеж. 2003. 201 с. [Korablev R.A. *Influence of Physical Factors on the Properties of Seeds and Growth of Seedlings of Scots Pine and Silver Birch*: Cand. Agric. Sci. Diss. Voronezh, 2003. 201 p.].
4. Куликова Н.Н. Экологические аспекты действия низкочастотного электромагнитного поля на биологические объекты растительного происхождения: дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2006. 145 с. [Kulikova N.N. *Ecological Aspects of the Action of a Low-Frequency Electromagnetic Field on Biological Objects of Plant Origin*: Cand. Biol. Sci. Diss. Moscow, 2006. 145 p.].
5. Новикова У.Е. Опыт выращивания сеянцев дуба красного в условиях Подмосковья // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 5. С. 52–54. [Novikova U.E. The Experience of the Cultivation of the Seedlings of the Red Oak in Conditions of Moscow Region. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2010, no. 5, pp. 52–54].
6. Патент № 155132 Российская Федерация, МПК А 01 С 1/00. Устройство для предпосевной обработки посевного материала: опубл. 20.09.2015 / Смирнов А.И., Орлов Ф.С. Бюл. № 26. 6 с. [Smirnov A.I., Orlov F.S. *Device for Pre-Sowing Processing of Seed Material*. Patent RF no. RU 155132 U1, 2015. 6 p.].
7. Патент № 2591969 Российская Федерация, МПК А 01 С 1/00. Способ предпосевной обработки семян и устройство для его осуществления опубл. 20.07.2016 / Смирнов А.И., Орлов Ф.С.: Бюл. № 20. 7 с. [Smirnov A.I., Orlov F.S. *Method of Preplanting Treatment of Sowing Material and Device Therefor*. Patent RF no. RU 2591969 C1, 2016. 7 p.].
8. Редько Г.И., Мерзленко М.Д., Бабич Н.А., Трещевский И.В. Лесные культуры и защитное лесоразведение / под общей ред. Г.И. Редько. СПб.: СПбГЛТА, 1999. 419 с. [Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A., Treshchevskiy I.V. *Forest Plantations and Protective Afforestation*. Ed. by G.I. Red'ko. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 1999. 419 p.].
9. Свалов Н.Н. Вариационная статистика. 4-е изд., стер. М.: МГУЛ, 2001. 80 с. [Svalov N.N. *Variation Statistics*. Moscow, MGUL Publ., 2001. 80 p.].
10. Смирнов А.И. Влияние электромагнитных полей низкой частоты на рост сеянцев сосны обыкновенной // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2014. № 4. С. 52–56. [Smirnov A.I. The Influence of Electromagnetic Pour on Low Frequency to an Increase in the Seedlings of the Pine Tree of Usual. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2014, no. 4, pp. 52–56].
11. Смирнов А.И. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной в питомниках зоны смешанных лесов: дис. ... канд. с.-х. наук. Мытищи, 2016. 102 с. [Smirnov A.I. *Influence of a Low Frequency Electromagnetic Field on Seed Germination and Growth of Scots Pine Seedlings in Nurseries of Mixed Forest Zone*: Cand. Agric. Sci. Diss. Mytischi, 2016. 102 p.].
12. Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Дроздов И.И. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на прорастание семян и рост сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 3. С. 53–58. [Smirnov A.I., Orlov F.S.,

Drozdov I.I. Influence of Low Frequency Electromagnetic Field on Seed Germination and Growth of Seedlings of Scots Pine and Norway Spruce. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 3, pp. 53–58]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.3.53](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.3.53), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ad1/smironov.pdf>

13. Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Беляев В.В., Аксенов П.А. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на биометрические характеристики семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 78–85. [Smironov A.I., Orlov F.S., Belyaev V.V., Aksenov P.A. Influence of Low-Frequency Electromagnetic Field on Biometric Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 78–85]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.2.78](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.78), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/30f/78_85.pdf

14. Crous J.W. Use of Hydrogels in the Planting of Industrial Wood Plantations. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 2017, vol. 79, iss. 3, pp. 197–213. DOI: [10.2989/20702620.2016.1221698](https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1221698)

15. De Lucas M., Etchells J.P. *Xylem. Methods and Protocols*. New York, Humana Press, 2017. 262 p. DOI: [10.1007/978-1-4939-6722-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6722-3)

16. Fischer G., Tausz M., Köck M., Grill D. Effect of Weak 16 $\frac{2}{3}$ Hz Magnetic Fields on Growth Parameters of Young Sunflower and Wheat Seedlings. *Bioelectromagnetics*, 2004, vol. 25, iss. 8, pp. 638–641. DOI: [10.1002/bem.20058](https://doi.org/10.1002/bem.20058)

17. Mudhanganyi A., Maravanyika C., Ndagurwa H.G.T., Mwase R. The Influence of Hydrogel Soil Amendment on the Survival and Growth of Newly Transplanted *Pinus patula* Seedlings. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, iss. 1, pp. 103–109. DOI: [10.1007/s11676-017-0428-1](https://doi.org/10.1007/s11676-017-0428-1)

18. Sarvaš M., Pavlenda P., Takáčová E. Effect of Hydrogel Application on Survival and Growth of Pine Seedlings in Reclamations. *Journal of Forest Science*, 2007, vol. 53, iss. 5, pp. 204–209.

19. Schweingruber F.H. *Wood Structure and Environment*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007. 279 p. DOI: [10.1007/978-3-540-48548-3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-48548-3)

20. Viero P.W.M., Little K.M. A Comparison of Different Planting Methods, Including Hydrogels, and Their Effect on Eucalypt Survival and Initial Growth in South Africa. *Southern African Forestry Journal*, 2006, vol. 208, iss. 1, pp. 5–13. DOI: [10.2989/10295920609505256](https://doi.org/10.2989/10295920609505256)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ГИДРОГЕЛЯ НА ПРИЖИВАЕМОСТЬ И РОСТ ОДНОЛЕТНИХ СЕЯНЦЕВ ДУБА КРАСНОГО (*Quercus rubra* L.)

А.И. Смирнов¹, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9530-6210>

Ф.С. Орлов¹, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8772-4428>

П.А. Аксенов², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-1352-2019](https://orcid.org/H-1352-2019),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1716-7726>

Ю.В. Яськов³, директор Донского лесхоза;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2140-9169>

¹ООО «Разносервис», Лихов пер., д. 10, Москва, Россия, 127051; e-mail: 364-27-37@mail.ru, ar-6@yandex.ru

²Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская область, Россия, 141005; e-mail: axenov.pa@mail.ru, forestmaster@yandex.ru

³ГАУ «Донской лесхоз» Управления лесного хозяйства Липецкой области, ул. Мира, д. 19, с. Донское, Задонский р-н, Липецкая обл., Россия, 99240; e-mail: forester48@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты исследования, которое проводилось в лесном питомнике Донского лесхоза Управления лесного хозяйства Липецкой области. Цель исследования определить как гидрогель «Эвабиона» и низкочастотное электромагнитное поле (ЭМП) влияют на приживаемость и рост однолетних сеянцев дуба

красного в открытом грунте питомника. В работе приведена технология создания посадочного материала дуба красного с повышенными показателями приживаемости опытных образцов и их биометрических характеристик: высота сеянца, диаметр сеянца у корневой шейки, масса корней и надземной части в воздушно-сухом состоянии после высушивания в течение 15 дней. Обработка однолетних сеянцев дуба красного низкочастотным электромагнитным полем проводилась по авторской технологии ПОСЭП (предпосевная обработка семян и сеянцев электромагнитным полем). В постановке опытов применялся гидрогель «Эвабиона», полимерный влагоудерживатель, который при внесении в почву, поглощает и удерживает большое количество влаги в зоне ризосферы растений. Способность гранул гидрогеля к разбуханию-сжатию улучшает структуру и дренаж почв, повышая условия аэрации и фильтрации воды, сохраняет свои влагоудерживающие свойства в течение нескольких лет. Полученные результаты исследования свидетельствуют о явном положительном влиянии обработки электромагнитным полем и гидрогелем, так как отмечено существенное увеличение приживаемости опытных образцов сеянцев дуба по отношению к контролю, также в рамках исследования, в конце вегетационного сезона в лаборатории кафедры лесных культур, селекции и дендрологии Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана был проведен сравнительный гистометрический анализ поперечных срезов контрольных и опытных стволиков сеянцев дуба. Результаты этого исследования показали, что электромагнитное поле и гидрогель могут оказывать влияние на анатомическое строение сеянцев, улучшая их качественные характеристики. Таким образом, предпосадочная обработка сеянцев дуба низкочастотным электромагнитным полем и применение гидрогеля показали эффективность данных приемов для увеличения приживаемости сеянцев и получения качественного посадочного материала дуба красного в лесных питомниках.

Для цитирования: Smirnov A.I., Orlov F.S., Aksenov P.A., Yaskov Yu.V. The Effectiveness of Low Frequency Electromagnetic Field and Hydrogel Influence on Survival Rate and Growth of Red Oak (*Quercus rubra* L.) Annual Seedlings // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 81–89. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-81-89

Ключевые слова: низкочастотное электромагнитное поле, технология ПОСЭП, гидрогель, сеянцы дуба красного, гистометрический анализ.

Поступила 16.01.20 / Received on January 16, 2020

УДК 630*627.3:574.4:903.27(470.22)
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-90-105

РЕКРЕАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ «БЕЛОМОРСКИЕ ПЕТРОГЛИФЫ» (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

А.В. Туунен, мл. науч. сотр.; ResearcherID: C-6958-2013,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6145-0513>

В.В. Тимофеева, канд. биол. наук, науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0036-4184>

А.Ю. Карпечко, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: AAL-8675-2020,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-2510>

Ю.Н. Ткаченко, вед. почвовед; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4274-0907>

В.А. Карпин, мл. науч. сотр.; ResearcherID: AAT-1801-2020,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5508-3104>

Н.В. Петров, канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9644-5968>

Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: tuyunen@krc.karelia.ru, timofeevavera2010@yandex.ru, yuvkarp@onego.ru, tkachenko@krc.karelia.ru, landscapeexplorer@gmail.com, nvpetrov@krc.karelia.ru

Впервые для региона выполнено исследование объекта культурного наследия «Беломорские петроглифы», используемого для экскурсионного обслуживания посетителей. Это компактно расположенная система частично расчищенных от лесной растительности скальных выходов с выбитыми изображениями эпохи неолита и пешеходными тропами. Выявлены особенности трансформации почв, компонентов растительного покрова (древостой, подрост, подлесок, живой напочвенный покров), а также тонких (диаметр до 3 мм) корней древесных пород под воздействием рекреации. В результате вытаптывания происходит деформация и уничтожение верхних почвенных горизонтов со значительным снижением мощности лесной подстилки и запаса органического вещества. Объект характеризуется высоким уровнем сохранности флоры, 95...100 % которой представлено аборигенными видами. Выраженные повреждения напочвенного покрова приурочены к активно используемым участкам (тропы, смотровые площадки). Для них характерен скудный видовой состав, сокращение площади травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов и незначительное проективное покрытие луговых и сорных видов. На участках с хорошей доступностью и проходимостью наблюдается отсутствие или уменьшение количества подлеска, отмечены повреждения древостоя и ухудшение лесовосстановительного процесса с сокращением численности жизнеспособного подроста до минимальных (100 экз./га) значений. Масса корней диаметром до 3 мм на тропах с сильной степенью вытаптывания снижается до 74 %, на менее поврежденных тропах отмечается незначительное повышение корненасыщенности. Установлено, что к настоящему моменту рекреационные изменения фитоценозов не привели к потере ими устойчивости. Изученные участки были отнесены к I–III стадиям рекреационной дигрессии. Для ограничения рекреационного воздействия следует оптимизировать существующее функциональное зонирование территории путем приоритетного использования наиболее устойчивых сообществ. Рекреационные нагрузки на интенсивно используемые в настоящее время участки, для которых существует вероятность перехода на более высокие стадии рекреационной дигрессии с потерей сообществами устойчивости, могут быть уменьшены при соответствующем изменении конфигурации тропиной сети, а также строительстве настилов.

Для цитирования: Туюнен А.В., Тимофеева В.В., Карпечко А.Ю., Ткаченко Ю.Н., Карпин В.А., Петров Н.В. Рекреационные изменения компонентов лесных экосистем на примере объекта культурного наследия «Беломорские петроглифы» (Республика Карелия) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 90–105. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-90-105

Финансирование: Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Института леса КарНЦ РАН.

Благодарность: Выражаем искреннюю благодарность М.А. Бойчук (Институт биологии КарНЦ РАН) за определение (верификацию) образцов мхов.

Ключевые слова: рекреационная нагрузка, вытаптывание, почва, лесная подстилка, живой напочвенный покров, флора, древостой, дигрессия, тонкие корни, корненасыщенность.

Введение

Увеличение рекреационных потребностей населения делает актуальным изучение последствий нагрузок на лесную среду – основное место для отдыха [27], а возможность рекреационного использования лесов является важной составляющей их биоресурсных функций [26].

При возрастании рекреационной нагрузки на экосистемы неизбежно происходят негативные изменения местообитаний [34], в том числе компонентов фитоценоза: травяно-кустарничкового покрова, древостоя, подроста и подлеска [20, 31]. Почвенный покров на территориях, испытывающих рекреационный пресс, как правило, уплотняется, механически уничтожается верхний подстилочный почвенный горизонт, повреждаются скелетные корни и уменьшается масса тонких физиологически активных корней [32, 33, 36, 37, 40].

Виды лесного покрова по-разному реагируют на антропогенную нагрузку. Ключевыми визуальными признаками дигрессии фитоценозов являются: повреждение или уничтожение подроста и деревьев; нарушение процессов лесовосстановления; исчезновение лишайников; замена лесных мхов пионерными видами, устойчивыми к вытаптыванию; появление луговых и сорных трав, вытесняющих лесные виды [9, 12, 14, 30, 35].

Высшие и низшие растения, а также лишайники разрушают скальную поверхность корневыми системами и талломами. В результате их деятельности происходит химическое и физическое преобразование поверхности скал. Поэтому с точки зрения охраны памятников наскального искусства с выбитыми изображениями эпохи неолита (петроглифами) от влияния биологических агентов необходим мониторинг за состоянием поверхности скальных выходов, который позволит принять своевременные меры по регулированию процессов зарастания [3, 13].

В результате активной рекреации отмечается общее снижение санитарно-гигиенических и средообразующих качеств фитоценозов, ухудшаются жизненное состояние и эстетические качества древостоев. Таким образом, существует необходимость всестороннего изучения влияния рекреации на лесной покров [38, 41].

В Республике Карелия (РК) комплексное изучение трансформации экосистем под воздействием рекреационных нагрузок было проведено для о-ва Валаам, расположенного в северной части Ладожского озера [10]. В различных

аспектах изучались почвы, живой напочвенный покров, древесная растительность, выявлялась связь лесопатологических характеристик фитоценозов с рекреационными нагрузками и др. Отмечена высокая скорость развития рекреационных изменений. За 10–15 лет с начала использования отдельные участки характеризовались переходом к IV-V стадиям рекреационной дигрессии. В 2009 г. подобные комплексные исследования проводились для туристических стоянок национального парка «Паанаярви» (Лоухский р-н РК) [39]. Выполнялась оценка рекреационных изменений почв, живого напочвенного покрова, древесной растительности. Установлено, что благоустроенные туристические стоянки подвержены значительным рекреационным изменениям с тотальным нарушением лесной среды в местах наибольшей концентрации отдыхающих (увеличение времени пребывания) при отсутствии подобных изменений вне их пределов.

В 2018 г. объект культурного наследия «Беломорские петроглифы» был внесен в предварительный список объектов Всемирного наследия UNESCO (<https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6358/>). Актуальность изучения рассматриваемой территории также обусловлена особенностями ее географического положения. Известно, что степень влияния рекреации на растительный покров зависит от многих факторов, в том числе климатических и почвенных условий [34, 41]. Объект «Беломорские петроглифы» располагается в Маанселькя-Беломорском агроклиматическом районе, характеризующемся продолжительной и суровой зимой, коротким и прохладным вегетационным и коротким безморозным периодами [1]. Это определяет потенциально более высокую скорость развития рекреационных изменений экосистем, существующих в столь суровых условиях. В пределах РК нет других объектов, сочетающих подобное географическое положение и интенсивность использования (посещаемость объекта в отдельные дни может превышать 500 чел.). Имеющиеся к настоящему времени сведения о рекреационных изменениях касаются отдельных объектов, расположенных в более благоприятных условиях средней тайги [10].

Цель исследования – определение состояния компонентов лесных экосистем объекта «Беломорские петроглифы» и оценка их трансформации с позиций сохранения устойчивости используемых участков к рекреационным нагрузкам.

Объекты и методы исследования

Объект «Беломорские петроглифы», открытый А.М. Линевским в 1926 г. [13], расположен в Беломорском р-не РК, в 6 км к юго-западу от г. Беломорск. 11 групп наскальных рисунков имеют общую площадь около 7700 м², причем только на одно скопление (группу) «Петроглифы Залавруги» (координаты центра 64°29'52.59" с. ш., 34°40'28.22" в. д.) приходится 85 % этой площади. Особенностью является расположение изучаемого объекта вблизи искусственно созданного во время строительства гидроэлектростанции водохранилища и осушенного русла р. Выг. Лесные участки окрестностей групп петроглифов входят в состав зеленой зоны г. Беломорска и водоохранной зоны, выделенной вокруг Золотецкого водохранилища (квартал 77 Беломорского участкового лесничества), что предполагает существенные ограничения лесохозяйственной деятельности.

Почвенный покров изучаемой территории представлен комбинацией подзолов иллювиально-железистых с неполноразвитыми почвами. Эти подзолы являются фоновыми почвами для данной территории. Под ельниками черничными распространены почвы супесчаного гранулометрического состава, под сосняками брусничными – более легкого, песчаного. Лесной покров характеризуется преобладанием производных сосновых и еловых древостоев с различным участием лиственных пород (березы и осины). Доля хвойных пород в составе таких древостоев варьирует в широких пределах: от 5 до 10 ед. Типологическая структура изученной территории достаточно однообразна. Отмечены исключительно древостои, относящиеся к зеленомошной группе типов леса. Наиболее типичны для данной территории сосняк брусничный (брусничный скальный), ельник черничный и осинник черничный (коренной тип – ельник черничный). Возраст наиболее старых экземпляров сосны и ели не превышает 200 лет.

Во время работы определяли мощность лесной подстилки, запас органического вещества. При изучении влияния рекреации на массу тонких корней было принято разделение троп на две категории: тропы с невысокой рекреационной нагрузкой, характеризующиеся сохраненной лесной подстилкой без обнажения минеральных горизонтов; тропы с интенсивной нагрузкой, на которых происходит уничтожение органогенного горизонта или его частичное перемешивание с нижележащими минеральными горизонтами. В качестве контрольных подбирали участки без признаков вытаптывания, где сохранена растительность, характерная для данного типа леса. Применяли метод монолитов, из которых извлекали корни древесных пород диаметром до 3 мм. Далее их высушивали до абсолютно сухого состояния и взвешивали.

Описание фитоценозов проводили с учетом методических указаний по изучению типов леса [15], таксацию лесных массивов – выборочным методом [18], оценку рекреационных изменений – по 5-стадийной схеме рекреационной дигрессии [16]. За границу устойчивости фитоценоза принимали III стадию рекреационной дигрессии, поскольку на IV стадии лес утрачивает способность к возобновлению вследствие гибели подроста [2, 16].

Оценку трансформации живого напочвенного покрова (ЖНП) лесных фитоценозов выполняли по двум направлениям: 1 – изменение флоры и растительности под воздействием рекреации в лесных массивах по периметру скал с петроглифами; 2 – выявление степени зарастания скальных обнажений в местах непосредственного расположения наскальных рисунков. Геоботанические описания ЖНП проводили в зависимости от степени нарушения на трансектах длиной 30...100 м. Площадь описываемых площадок в пределах трансект (вытопанных и условно ненарушенных – контроля) составляла 10×10 м. Также оценивали количество и состояние троп (степень вытоптанности, ширина и благоустройство, заселение сорными видами сосудистых растений). Латинские и русские названия в тексте и таблицах, а также объем таксонов сосудистых растений даны преимущественно в соответствии со сводкой Н.Н. Цвелева (2000 г.) [19] с уточнениями [29], названия мхов – по М.С. Ignatov et al. (2006 г.) [28], лишайников – по М.А. Фадеевой и др. (2007 г.) [17]. Собранный гербарный материал хранится в Гербарии КарНЦ РАН (РТЗ).

Результаты исследования и их обсуждение

Ведущим фактором, оказывающим воздействие на оцениваемые характеристики почв, является вытаптывание [31], в результате которого происходит

деформация и уничтожение верхних почвенных горизонтов [10, 44]. Мощность лесной подстилки уменьшилась с 2,0...4,0 см (ненарушенные участки) до 0,5...1,0 см. На тропах с невысокой рекреационной нагрузкой запас органического вещества снизился на 28 % по сравнению с контролем. В зонах интенсивной нагрузки органогенный горизонт уничтожается или часть его перемешивается с нижележащими минеральными горизонтами. Запас органического вещества здесь снижается на 60 %.

Тонкие физиологически активные корни играют ведущую роль в поглощении из почвы воды и растворенных в ней питательных веществ [4, 24]. Известно, что ухудшение физических свойств почвы приводит к уменьшению их массы [5, 22]. На тропах, наиболее интенсивно используемых рекреантами, масса корней диаметром ≤ 3 мм в верхнем (20 см) слое почвы снижена до 74 % (табл. 1).

Таблица 1

Масса корней диаметром до 3 мм у древесных пород

Место отбора	Степень вытоптанности	Масса корней	
		т/га	% изменения
Контроль	Не выражена	1,54 ± 0,33	0
Тропа	Слабая	2,07 ± 0,25	+34
Контроль	Не выражена	3,44 ± 0,25	0
Тропа	Слабая	3,93 ± 0,67	+14
Контроль	Не выражена	1,75 ± 0,43	0
Тропа	Слабая	1,78 ± 0,45	+2
Контроль	Не выражена	3,27 ± 0,21	0
Тропа	Сильная	2,73 ± 0,11	-17*
Контроль	Не выражена	7,27 ± 1,04	0
Тропа	Сильная	1,91 ± 0,40	-74*

*Различия достоверны при $p < 0,05$.

Тропы с меньшей интенсивностью вытаптывания имеют корненасыщенность на 2...30 % выше по сравнению с контролем. Подобное увеличение количества тонких корней в зонах, вытоптаных в ходе рекреационного воздействия, было отмечено в работе [44], где оно объяснялось дополнительным поступлением минеральных веществ. Однако в нашем случае некоторое увеличение количества тонких корней в зоне троп с невысокой рекреационной нагрузкой вероятно обусловлено лучшей освещенностью на этих участках и доступностью дневной поверхности солнечной радиации, а также снижением конкуренции со стороны другой растительности (живого напочвенного покрова, подлеска). На неполноразвитых почвах, бедных элементами минерального питания и представленными на изучаемом объекте, корневые системы древесных растений в большей степени концентрируются в верхних горизонтах, где находятся и корни другой растительности. Таким образом происходит обострение конкуренции в этой ограниченной нише за питательные вещества. На тропах (и их периферии) с рекреационной нагрузкой растительность практически отсутствует, что создает благоприятные условия и обеспечивает увеличение массы корневых систем древесных растений.

К настоящему времени на группе «Петроглифы Залавруги» отчасти создана инфраструктура по ограничению интенсивности рекреационного воздействия на природные комплексы. Она представлена деревянными настилами, служащими защитой от вытаптывания. Тем не менее, покрытые лесом участки, непосредственно примыкающие к группе (и находящиеся «внутри» нее), подвергаются рекреационным нагрузкам. При изучении последствий от действия нагрузок было выделено и описано 6 участков (16–21) с учетом различия характеристик лесного покрова (табл. 2). Схема расположения участков приведена на рисунке.

Таблица 2

Таксационные показатели древостоев на группе «Петроглифы Залавруги»

Номер участка (по рисунку)	Тип леса	Состав	Возраст, лет	Средние		Полнота	Подрост, количество, экз./га
				высота, м	диаметр, см		
16	Ельник черничный	3E ₁₅₀ 2E ₅₀ 3Oc1C1B	150	16	22	0,7	10E, 2800
17	Сосняк брусничный скальный	10CедБ	45	8	8	0,6	10ЕедС, 100
18	Сосняк брусничный скальный	10C ₄₀ едC ₁₆₀ едЕедБ	40	8	8	0,8	10С, 300
19	Сосняк брусничный	7СЗЕедБ	200	13	16	0,6	10СедЕ, 900
20	Ельник черничный	4ЕЗБ2Ос1С	170	18	22	0,6	10Е, 3000
21	Осинник черничный	6Ос2Е ₁₁₀ 2Б+СедЕ ₈₀	110	23	26	0,7	10Е, 3000

По устойчивости к рекреационному воздействию изученные древостои значительно отличаются. Два из них (сосняки брусничные скальные на примитивных почвах, участки 17, 18) произрастают на почвах, бедных органическим веществом и характеризующихся сухим гидрологическим режимом, что определяет их наибольшую уязвимость к вытаптыванию [35]. Наибольшую устойчивость имеет осинник черничный, прочие древостои занимают промежуточное положение [21, 23]. Кроме того, участки различаются по интенсивности использования. В настоящее время наиболее активно с хозяйственными целями эксплуатируются сосняки брусничные участков 17, 18. Остальные участки используются для перемещения рекреантов по сформированным тропам и очень ограничено для стоянок.

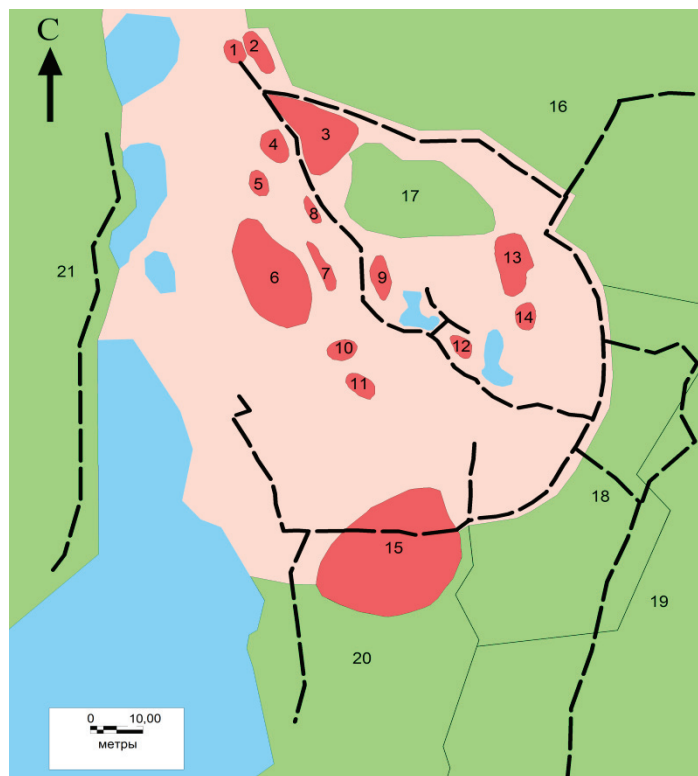


Схема расположения изученных участков растительности группы «Петроглифы Залавруги»; красным цветом обозначены участки с мохово-травяно-кустарничковым покровом (1–15), зеленым цветом – с древесным ярусом (16–21)

Layout of the studied vegetation areas of Petroglyphs in Zalavrug: red color – areas with a moss-herb-shrub layer (1–15); green color – areas with a tree layer (16–21)

Наилучшая доступность и проходимость обуславливают наиболее интенсивное использование с рекреационными целями участка 18. Для обслуживания туристов в его пределах сооружено несколько стоянок. В целом данный участок характеризуется поврежденными ЖНП и древостоем. Полностью отсутствует подросток, количество соснового подроста – 300 экз./га, при этом на соседнем с ним участке 19 (мало используемом с рекреационными целями) этот показатель составляет 900 экз./га. В пределах участка 18 имеются активно и длительно используемые туристические стоянки. На них произошло полное вытаптывание напочвенного покрова и разрушение подстилки, естественное возобновление отсутствует, обнаружены массовые механические повреждения растений древесного яруса. Однако площадь таких деградированных участков невелика и измеряется десятками квадратных метров.

Вследствие своего положения «внутри» скопления, значительная деградация прослеживается на участке 17. В настоящее время на его опушечных частях располагаются интенсивно используемые тропы, что привело к полному вытаптыванию ЖНП и разрушению лесной подстилки с обнажением и обламыванием скелетных корней. Экземпляры сосны, произрастающие вдоль тропы, ослаблены. Внутри участка отмечено практически полное отсутствие подроста

(около 100 экз./га) и подлеска. Фитоценоз находится на III стадии дигрессии с угрозой перехода на IV в ближайшее время.

На участках 16, 19, 20, 21 отмечены слабые последствия рекреационного воздействия, которые сконцентрированы в основном в окрестностях путей перемещения отдыхающих (троп с вытоптаным ЖНП). Они представлены, как правило, механическими повреждениями подроста и подлеска. Древостой следов механических повреждений не имеет, характеризуется удовлетворительным состоянием без признаков ослабления.

Таким образом, набор выявленных изменений древесной растительности вполне типичен для активно используемых в рекреационном отношении участков, схожие результаты отмечаются во многих работах подобного плана [23, 25, 34, 38, 43].

Известным принципом планирования рекреационного использования территорий является минимизация воздействия отдыхающих на наиболее уязвимые участки путем организации тропиной сети в обход них [23]. Однако в случае изучаемого объекта наиболее уязвимые лесные участки (сосняки брусничные скальные) используются с максимальной интенсивностью, что в будущем может привести к их дальнейшей деградации при увеличении потока посетителей. В первую очередь комплекс мероприятий по оптимизации существующей тропиной сети должен проводиться именно здесь.

Объект «Беломорские петроглифы» находится в пределах Выгозерского флористического района [11], или биогеографической провинции *Karelia rotomica orientalis* [7]. Всего в окрестностях десяти групп петроглифов зарегистрирован 151 вид сосудистых растений [6]. Наибольшим флористическим разнообразием отличается группа «Петроглифы Залавруги», где сосредоточено 96 % всех выявленных для этой территории видов сосудистых растений (табл. 3).

Таблица 3

**Флористическое разнообразие (число видов) лесных сообществ
объекта «Беломорские петроглифы»**

Группы петроглифов	Всего	Аборигенная фракция	Адвентивная фракция
На Безымянных о-вах I, II, III	35	34	1
На о-ве Большой Малинин	20	20	–
Ерпин Пудас I, II, III, IV	88	83	5
Залавруга	125	119	6
Золотец I	54	53	1

По количественным показателям флора района исследований имеет типичный для северотаежной части Карелии облик. От смежных территорий она отличается бедностью видового состава, обусловленной исходным небогатым флористическим составом сосновых лесов лишайниковой, брусничной и черничной групп типов местообитаний, а также слабым притоком в сообщества луговых и сорных видов.

На участках всех групп петроглифов абсолютно доминируют аборигенные виды сосудистых растений (95...100 % от всех видов флоры). Среди гео-

графических элементов преобладают виды с бореальным циркумполярным (40 видов), бореальным евразийским (29) и бореальным европейско-сибирским (19) типами ареала. Северные черты флоре придают элементы с «северными» связями – гипоарктические (6 видов). Ядро флоры формируют массовые в регионе лесные (63 вида; 44,4 %), болотные и луговые (по 29 видов; 20,4 %) виды. Это широко распространенные в Карелии кустарнички (*Calluna vulgaris*, *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*) и травы (*Avenella flexuosa*, *Chamaepericlymenum suecicum*, *Geranium sylvaticum*, *Linnaea borealis*, *Maianthemum bifolium*, *Melampyrum pratense*, *Trientalis europaea* и др.), являющиеся доминантами ЖНП лесных сообществ. Кустарниковый ярус (подлесок) повсеместно представлен типичными для лесов РК видами (*Alnus incana*, *Juniperus communis*, *Sorbus aucuparia*). Закономерно высоко количество прибрежных видов (11 видов; 7,7 %), на долю водных, опушечных, скальных и тундровых видов в сумме приходится 7,0 %.

Среди редких аборигенных видов сосудистых растений здесь присутствует злак *Glyceria lithuanica*, который в северной части Карелии встречается еще только в нескольких точках. Один вид *Moehringia lateriflora* занесен в Красную книгу Республики Карелия (2007 г.) [8] и ранее, в пределах Выгозерского флористического р-на, он был замечен только в одном пункте – д. Вирма [7].

Адвентивная фракция представлена крайне слабо – выявлены только 9 заносных видов (*Amelanchier spicata*, *Galium album*, *Hypericum maculatum*, *Plantago major*, *Poa annua*, *Puccinellia distans*, *Taraxacum officinale*, *Trifolium pratense*, *T. repens*), что составляет 6,0 % от их общего числа. Преобладающее число адвентиков встречается на скалах Залавруги, как на территории, испытывающей наибольшие рекреационные нагрузки.

«Петроглифы Залавруги» – самая крупная по площади группа беломорских наскальных рисунков, которая практически постоянно находится под прессом активной рекреации. Несмотря на это ЖНП лесных массивов, окружающих данное скопление петроглифов, в настоящее время не имеет существенных признаков нарушения: покров трансформирован (вытоптан) только в пределах подходящих к петроглифам троп, ширина которых варьирует от 0,3 до 2...3 м, и туристических стоянок. Высокая общая сохранность растительного покрова обусловлена тем, что передвижение рекреантов осуществляется преимущественно по тропам и деревянным настилам, установленным вблизи изображений.

Выше на рисунке показана схема зарастания петроглифов Залавруги в пределах контура смотровых площадок, окруженных деревянными настилами (участки 1–15). Данные о доминирующих видах ЖНП на скальных выходах этой группы петроглифов приведены в табл. 4.

Площадь зарастания скал в месте расположения наскальных рисунков составляет около 13,5 % от общей площади экспозиции. В понижениях (скальных ваннах), где часто скапливается вода (участки 9–11), растительность представлена преимущественно сообществами гидрофильных мхов рода *Sphagnum* (*Sphagnum angustifolium*, *S. fallax*, *S. russowii*), проективное покрытие которых составляет 80...90 % участка, в сочетании с типичными для болот Карелии видами сосудистых растений (*Carex paupercula*, *Drosera rotundifolia*, *Eriophorum vaginatum* и др.). На возвышенных или ровных скальных поверхностях (участки 2, 5, 13, 14) в покрове доминирует *Pholia nutans* (30...60 %) в сообществе с типичными лесными, луговыми и скальными видами (*Calluna vulgaris*, *Festuca ovina*, *Vaccinium vitis-idaea*).

Наибольшей трансформации ЖНП подвержен на участках 13 (территория у здания офиса) и 15.

Таблица 4

Доминирующие виды живого напочвенного покрова скальных выходов петроглифов Залавруги

Параметры участка, таксоны	Номер участка														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Площадь участка, м ²	9	54	240	27	14	140	4,5	5	9	9	9	6	170	9	345
Количество видов деревьев и кустарников, шт.	1	2	2	3	2	4	—	—	—	—	1	—	—	—	3
Проективное покрытие, %:															
общее	50	65	50	80	85	70	95	70	90	90	90	80	50	80	65
кустарнички и травы:															
<i>Calluna vulgaris</i>	5	—	<1	45	40	20	15	1	3	3	3	5	3	<1	<1
<i>Carex rostrata</i>	20	—	—	—	—	<1	<1	<1	—	—	—	—	—	—	—
<i>Festuca ovina</i>	—	<1	3	30	—	—	<1	—	<1	<1	<1	—	2	<1	3
<i>Juncus filiformis</i>	—	—	—	—	—	<1	—	—	<1	<1	5	3	—	—	—
<i>Melampyrum pratense</i>	<1	—	<1	—	—	3	—	<1	—	<1	—	—	—	—	1
<i>Trifolium repens</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15
<i>Vaccinium myrtillus</i>	—	—	<1	55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	—	20	1	—	—	5	—	3	—	—	—	—	—	—	5
мхи и лишайники:															
<i>Dicranum scorarium</i>	—	15	15	<1	<1	<1	<1	—	<1	<1	<1	—	—	—	—
<i>Pleurozium schreberi</i>	—	<1	3	35	20	—	<1	30	—	—	—	—	—	<1	<1
<i>Pholia mitans</i>	—	30	15	3	60	—	—	—	—	—	—	—	50	55	45
<i>Polytrichum</i> spp.	—	—	—	—	—	<1	<1	—	—	<1	<1	<1	<1	30	10
<i>Sphagnum</i> spp.	10	—	3	—	2	10	90	40	90	90	90	80	—	—	<1

Примечание. «< 1» – проективное покрытие таксона менее 1 %.

Площадь вытаптывания здесь достигает 60 %, встречаются фрагменты, выбитые до минерального горизонта почвы с оголенными корнями деревьев. В покрове преобладают мхи с пионерными стратегиями роста (*Bryum* spp., *Ceratodon purpureus*, *Pholia nutans*); общее проективное покрытие мхов – 40...50 %. Травяно-кустарничковый ярус существенно трансформирован – покрытие видов не превышает 2...20 %, преобладают синантропные виды (*Poa annua*, *Taraxacum officinale*, *Trifolium pratense*).

Для направления потоков посетителей группа «Петроглифы Залавруги» оборудована разветвленной сетью деревянных настилов в центральной части и по контуру скальных выходов с севера и востока. Так как проходящие по периферии настилы не оснащены перилами, происходит постепенная деградация ЖНП в пределах 1...2 м вдоль мостков. Виды травяно-кустарничкового яруса исчезают, лесные мхи разрушаются и заменяются сообществами пионерных видов.

Таким образом, установлено, что в настоящее время влияние рекреации на ЖНП лесов в районе 10 групп петроглифов существенно не изменило его структуру. Интенсивная рекреация носит локальный характер и затрагивает только самые активно посещаемые туристами участки – смотровые площадки вблизи наскальных рисунков и тропы, в пределах которых ЖНП на нескольких квадратных метрах может быть полностью выбит (например, петроглифы на о-ве Большой Малинин, петроглифы Залавруги). Для этих участков характерно резкое сокращение площади травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов при одновременном скудном видовом разнообразии и незначительном проективном покрытии почвы луговыми и сорными видами, что также согласуется с результатами других исследователей [9, 34, 42].

Заключение

Рекреационное использование изучаемого объекта к настоящему времени привело к изменению характеристик компонентов, слагающих его фитоценозы. Ведущим фактором, оказывающим воздействие на оцениваемые характеристики, является вытаптывание. Отмечены значимые изменения в структуре почв, связанные с нарушением подстилочного горизонта. Флористические комплексы ЖНП объекта рекреационным воздействием затронуты относительно слабо, в составе сосудистых растений изученной территории абсолютно преобладают аборигенные виды флоры, высокая сохранность которых объясняется высокой распространенностью на изучаемой территории бедных по эдафическим условиям местообитаний, а также общей суровостью климатических условий. Эти факторы ограничивают проникновение адвентивных видов флоры в нарушенные экосистемы. Вытаптывание к настоящему времени привело к изменению массы тонких корней древесного яруса. В долгосрочной перспективе это обуславливает ослабление древостоев и снижение их устойчивости к грибным болезням и насекомым-вредителям. Исходя из позиций формализованной комплексной оценки рекреационных изменений изучаемые участки характеризуются в основном I–III стадиями рекреационной дигрессии, т. е. имеют нарушенное состояние, однако сохраняют свою устойчивость. Рекреационное воздействие сконцентрировано в основном в пределах сложившейся тропиной сети и на небольших участках, наиболее интенсивно используемых с хозяйственными и экскурсионными целями.

Можно рекомендовать изменение функционального зонирования территории с учетом устойчивости слагающих ее экосистем для рассредоточения и перераспределения рекреационных нагрузок, а также проведение мероприятий, направленных на повышение устойчивости к рекреационным нагрузкам наиболее уязвимых и одновременно наиболее интенсивно используемых в настоящее время лесных участков (дальнейшее строительство настилов, ограничение доступа к максимально деградированным фрагментам). Полученные результаты изучения рекреационного воздействия на экосистемы объекта «Беломорские петроглифы» могут быть применены как в текущем, так и в перспективном планировании в целях минимизации негативных последствий использования территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Атлас Карельской АССР. М.: ГУГК, 1989. 40 с. [*Atlas of the Karelian ASSR*. Moscow, GUGK Publ., 1989. 40 p.].
2. Беднова О.В. Метод индикации и оценки рекреационных изменений в лесных биогеоценозах // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2013. № 7(99). С. 77–87. [Bednova O.V. The Method of Changes Assessment in Recreation Forests. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 7(99), pp. 77–87].
3. Дэвлет Е.Г. Памятники наскального искусства: изучение, сохранение, использование. М.: Науч. мир, 2002. 240 с. [Devlet E.G. *Rock Art Heritage: Study, Conservation and Use*. Moscow, Scientific World Publ., 2002. 240 p.].
4. Калинин М.И. Формирование корневой системы деревьев. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 152 с. [Kalinin M.I. *Formation of the Tree Root System*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 152 p.].
5. Карпечко А.Ю. Изменение плотности и корненасыщенности почв под влиянием лесозаготовительной техники в еловых лесах южной Карелии // Лесоведение. 2008. № 5. С. 66–70. [Karpechko A.Yu. Changes in Density and Root Mass in Soils under the Influence of Harvesting Machines in Spruce Forests of Southern Karelia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2008, iss. 5, pp. 66–70].
6. Комплексная характеристика и оценка природных комплексов, определение допустимой антропогенной нагрузки на участках с петроглифами и территории окружающего ландшафта на побережьях Онежского озера и Белого моря (2017–2018 гг.): науч. отчет № ОУ-12/17-14. Рук. Громцев А.Н. / Респ. центр по гос. охране объектов культурного наследия. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 2018. [*Integrated Description and Assessment of Natural Ecosystems, Determination of Permissible Anthropogenic Pressure on Petroglyph-Bearing Sites and Surrounding Landscapes on the Shores of Lake Onego and the White Sea (2017–2018)*: Scientific Report No. ОУ-12/17-14. Supervision by A.N. Gromtsev. Republican Center for State Protection of Cultural Heritage Sites. Petrozavodsk, KarRC RAS, 2018].
7. Кравченко А.В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 403 с. [Kravchenko A.V. *A Compendium of Karelian Flora (Vascular Plants)*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2007. 403 p.].
8. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 364 с. [*The Red Book of the Republic of Karelia*. Petrozavodsk, Karelia Publ., 2007. 364 p.].
9. Полякова Г.А., Мальшева Т.В., Флеров А.А. Антропогенное влияние на сосновые леса Подмосковья. М.: Наука, 1981. 144 с. [Polyakova G.A., Malysheva T.V., Flerov A.A. *Anthropogenic Impact on Pine Forests in the Surroundings of Moscow*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 144 p.].
10. Природные комплексы Валаама и воздействие на них рекреации. Петрозаводск: Изд-во Карел. филиала АН СССР, 1983. 190 с. [*Natural Ecosystems of Valaam and Recreational Impact on Them*. Petrozavodsk, Karel'skiy filial AN SSSR Publ., 1983. 190 p.].

11. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 215 с. [Ramenskaya M.L. *Analysis of the Flora of the Murmansk Region and Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 215 p.]
12. Рысин Л.П. Рекреационные леса и проблема оптимизации рекреационного лесопользования // Рекреационное лесопользование в СССР. М.: Наука, 1983. С. 5–20. [Rysin L.P. *Recreational Forests and Optimization of Recreational Forest Management*. Moscow, Nauka Publ., 1983, pp. 5–20].
13. Савватеев Ю.А. Вечные письмена (наскальные изображения Карелии). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 458 с. [Savvateev Yu. A. *The Eternal Monuments (Petroglyphs of Karelia)*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2007. 458 p.]
14. Смаглюк К.К., Середин В.И., Питукин А.И., Парпан В.И. Исследование рекреационного лесопользования в Карпатах // Рекреационное лесопользование в СССР. М.: Наука, 1983. С. 81–95. [Smaglyuk K.K., Seredin V.I., Pitikin A.I., Parpan V.I. A Study of Recreational Forest Management in the Carpathians. *Recreational Forest Management in the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1983, pp. 81–95].
15. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 144 с. [Sukachev V.N., Zonn S.V. *Methodology Guidelines for the Study of Forest Types*. Moscow, AN SSSR Publ., 1961. 144 p.]
16. Тарасов А.И. Рекреационное лесопользование. М.: Агропромиздат, 1986. 176 с. [Tarasov A.I. *Recreational Forest Management*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 176 p.]
17. Фадеева М.А., Голубкова Н.С., Витикайнен О., Аhti Т. Конспект лишайников и лихенофильных грибов Республики Карелия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 194 с. [Fadееva M.A., Golubkova N.S., Vitikainen O., Ahti T. *Conspectus of Lichens and Lichenicolous Fungi of the Republic of Karelia*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2007. 194 p.]
18. Федосимов А.Н., Анисочкин В.Г. Выборочная таксация леса. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 172 с. [Fedosimov A.N., Anisochkin V.G. *Selective Forest Valuation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 172 p.]
19. Цвелев Н.Н. Определитель сосудистых растений Северо-Западной России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области). СПб.: Изд-во СПХФА, 2000. 781 с. [Tsvelev N.N. *Identification Guide of Vascular Plants of Northwest Russia (Leningrad, Pskov and Novgorod Regions)*. Saint Petersburg, SPCPA Publ., 2000. 781 p.]
20. Arnesen T. Vegetation Dynamics Following Trampling in Grassland and Heathland in Sølendet Nature Reserve, a Boreal Upland Area in Central Norway. *Nordic Journal of Botany*, 1999, vol. 19, iss. 1, pp. 47–69. DOI: [10.1111/j.1756-1051.1999.tb01902.x](https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1999.tb01902.x)
21. Arnesen T., Lyngstad A. Effekter av tråkk og annen ferdtsel på vegetasjonen i friluftsområder [Effects from Trampling and Other Activities in Recreation Areas]. *Blyttia*, 2012, vol. 70(3), pp. 159–172.
22. Berger T.W., Hager H. Physical Top Soil Properties in Pure Stands of Norway Spruce (*Picea abies*) and Mixed Species Stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 136, iss. 1-3, pp. 159–172. DOI: [10.1016/s0378-1127\(99\)00286-8](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00286-8)
23. Bjønness I.-M. Outdoor Recreation and Its Impact upon a Boreal Forest Area – Bymarka, Trondheim, Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift* [Norwegian Journal of Geography], 1981, vol. 35, iss. 2, pp. 57–77. DOI: [10.1080/00291958108552063](https://doi.org/10.1080/00291958108552063)
24. Brunner I., Godbold D.L. Tree Roots in a Changing World. *Journal of Forest Research*, 2007, vol. 12, iss. 2, pp. 78–82. DOI: [10.1007/s10310-006-0261-4](https://doi.org/10.1007/s10310-006-0261-4)
25. Hamberg L., Lehvävirta S., Malmivaara-Lämsä M., Rita H., Kotze D.J. The Effects of Habitat Edges and Trampling on Understorey Vegetation in Urban Forests in Helsinki, Finland. *Applied Vegetation Science*, 2008, vol. 11(1), pp. 83–98. DOI: [10.1111/j.1654-109X.2008.tb00207.x](https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2008.tb00207.x)
26. Hansen K., Malmaeus M. Ecosystem Services in Swedish Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 31, iss. 6, pp. 626–640. DOI: [10.1080/02827581.2016.1164888](https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1164888)

27. Harshaw H.W., Sheppard S.R.J., Kozak R.A. Outdoor Recreation and Forest Management: A Plea for Empirical Data. *The Forestry Chronicle*, 2007, vol. 83, no. 2, pp. 231–238. DOI: [10.5558/tfc83231-2](https://doi.org/10.5558/tfc83231-2)
28. Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A. et al. Check-List of Mosses of East Europe and North Asia. *Arctoa*, 2006, vol. 5, pp. 1–130. DOI: [10.15298/arctoa.15.01](https://doi.org/10.15298/arctoa.15.01)
29. *International Plant Names Index (IPNI)*. The Royal Botanic Gardens, Kew, Harvard University Herbaria & Libraries and Australian National Botanic Gardens. 2019. Available at: <http://www.ipni.org> (accessed 01.05.19).
30. Kangas K., Sulkava P., Koivuniemi P., Tolvanen A., Siikamäki P., Norokorpi Y. What Determines the Area of Impact around Campsites? A Case Study in a Finnish National Park. *Forest Snow and Landscape Research*, 2007, vol. 81, iss. 1/2, pp. 139–150.
31. Kissling M., Hegetschweiler K.T., Rusterholz H.-P., Baur B. Short-Term and Long-Term Effects of Human Trampling on Above-Ground Vegetation, Soil Density, Soil Organic Matter and Soil Microbial Processes in Suburban Beech Forests. *Applied Soil Ecology*, 2009, vol. 42, iss. 3, pp. 303–314. DOI: [10.1016/j.apsoil.2009.05.008](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.008)
32. Korkanc S.Y. Impacts of Recreational Human Trampling on Selected Soil and Vegetation Properties of Aladag Natural Park, Turkey. *Catena*, 2014, vol. 113, pp. 219–225. DOI: [10.1016/j.catena.2013.08.001](https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.001)
33. Kozłowski T.T. Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 6, pp. 596–619. DOI: [10.1080/02827589908540825](https://doi.org/10.1080/02827589908540825)
34. Liddle M. *Recreation Ecology: The Ecological Impact of Outdoor Recreation and Ecotourism*. London, Chapman & Hall, 1997. 639 p.
35. Malmivaara-Lämsä M., Hamberg L., Löfström I., Vanha-Majamaa I., Niemelä J. Trampling Tolerance of Understorey Vegetation in Different Hemiboreal Urban Forest Site Types in Finland. *Urban Ecosystems*, 2008, vol. 11, iss. 1, pp. 1–16. DOI: [10.1007/s11252-007-0046-3](https://doi.org/10.1007/s11252-007-0046-3)
36. Marion J.L., Cole D.N. Spatial and Temporal Variation in Soil and Vegetation Impacts on Campsites. *Ecological Applications*, 1996, vol. 6, iss. 2, pp. 520–530. DOI: [10.2307/2269388](https://doi.org/10.2307/2269388)
37. Mason S., Newsome D., Moore S., Admiraal R. Recreational Trampling Negatively Impacts Vegetation Structure of an Australian Biodiversity Hotspot. *Biodiversity and Conservation*, 2015, vol. 24, iss. 11, pp. 2685–2707. DOI: [10.1007/s10531-015-0957-x](https://doi.org/10.1007/s10531-015-0957-x)
38. Pickering C.M., Hill W. Impacts of Recreation and Tourism on Plant Biodiversity and Vegetation in Protected Areas in Australia. *Journal of Environmental Management*, 2007, vol. 85, iss. 4, pp. 791–800. DOI: [10.1016/j.jenvman.2006.11.021](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.021)
39. Research and Monitoring of Sustainability of Nature-Based Tourism and Recreational Use of Nature in Oulanka and Paanajärvi National Parks. Ed. by P. Siikamäki. *Oulanka Reports No. 29*. Oulu, University of Oulu, 2009. 52 p.
40. Sherman C., Unc A., Doniger T., Ehrlich R., Steinberger Y. The Effect of Human Trampling Activity on a Soil Microbial Community at the Oulanka Natural Reserve, Finland. *Applied Soil Ecology*, 2019, vol. 135, pp. 104–112. DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.11.013](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.11.013)
41. Sun D., Walsh D. Review of Studies on Environmental Impacts of Recreation and Tourism in Australia. *Journal of Environmental Management*, 1998, vol. 53, iss. 4, pp. 323–338. DOI: [10.1006/jema.1998.0200](https://doi.org/10.1006/jema.1998.0200)
42. Timofeeva V., Kutenkov S. Analysis of Recreational Impact on Living Ground Cover in Forests on Paanajärvi National Park (Republic of Karelia, Russia). Research and Monitoring of Sustainability of Nature-Based Tourism and Recreational Use of Nature in Oulanka and Paanajärvi National Parks. *Oulanka Reports No. 29*. Oulu, University of Oulu, 2009, pp. 16–26.
43. Vakhlamova T., Rusterholz H.-P., Kamkin V., Baur B. Recreational Use of Urban and Suburban Forests Affects Plant Diversity in a Western Siberian City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, vol. 17, pp. 92–103. DOI: [10.1016/j.ufug.2016.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.03.009)

44. Waltert B., Wiemken V., Rusterholz H.-P., Boller T., Baur B. Disturbance of Forest by Trampling: Effects on Mycorrhizal Roots of Seedlings and Mature Trees of *Fagus sylvatica*. *Plant and Soil*, 2002, vol. 243, iss. 2, pp. 143–154. DOI: [10.1023/a:1019983625473](https://doi.org/10.1023/a:1019983625473)

**RECREATIONAL CHANGES IN THE FOREST ECOSYSTEM COMPONENTS:
CASE STUDY OF THE CULTURAL HERITAGE SITE “WHITE SEA
PETROGLYPHS” (REPUBLIC OF KARELIA)**

A.V. Tuyunen, Junior Research Scientist; ResearcherID: [C-6958-2013](https://orcid.org/0000-0001-6145-0513),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6145-0513>

V.V. Timofeeva, Candidate of Biology, Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0036-4184>

A.Yu. Karpechko, Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [AAL-8675-2020](https://orcid.org/0000-0002-1693-2510),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-2510>

Y.N. Tkachenko, Leading Soil Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4274-0907>

V.A. Karpin, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAT-1801-2020](https://orcid.org/0000-0001-5508-3104),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5508-3104>

N.V. Petrov, Candidate of Agriculture, Junior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9644-5968>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: tuyunen@krc.karelia.ru, timofeevavera2010@yandex.ru, yuvkarp@onego.ru, tkachenko@krc.karelia.ru, landscapeexplorer@gmail.com, nvpetrov@krc.karelia.ru

Recreation digression of forest ecosystems in the heritage site “White Sea Petroglyphs” was studied for the first time. This site is a compact system of rock outcrops partially cleared of forest vegetation, which bear Neolithic rock carvings (petroglyphs), and are linked together by walking trails. Patterns have been identified in the transformation of soils, plant cover components (tree stand, tree seedlings, understory and living ground cover), as well as fine roots (within 3 mm in diameter) of woody species under the recreation impact. Trampling was found to deform and destroy the top soil horizons, entailing a significant loss of the forest floor thickness and organic matter stores. Overall, the flora of the area is quite well preserved; 95–100 % of which is represented by native species. The living ground cover is noticeably damaged in the most actively used sites (fragments of trails and vista points). They feature a poor species composition, shrinking of the herb-dwarf shrub and moss-lichen cover, and a low percent cover of grassland and ruderal species. Easily accessible and actively visited sites have no or reducing amounts of tree seedlings, the tree stand is damaged and forest regeneration is hampered – the number of viable seedlings is minimal (100 pcs/ha). The mass of roots below 3 mm in diameter in heavily trampled trails showed a reduction of up to 74 %, while the root saturation in less affected trails slightly increased. Recreation transformations of the plant communities have not resulted in a loss of their resilience so far. The recreational digression in the studied sites was classified into stages I–III (weakly disturbed – strongly disturbed). Function zoning of the area should be modified using recreation-tolerant communities more intensively in order to reduce recreation impact. The most damaged areas, which are losing their stability, should be excluded from active use by modification of walking trails and building additional boardwalks.

For citation: Tuyunen A.V., Timofeeva V.V., Karpechko A.Yu., Tkachenko Y.N., Karpin V.A., Petrov N.V. Recreational Changes in the Forest Ecosystem Components: Case Study of the Cultural Heritage Site “White Sea Petroglyphs” (Republic of Karelia). *Lesnoy*

Zhurnal [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 90–105. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-90-105

Funding: The research was financially supported from the federal budget for the fulfillment of the state assignment of the Forest Research Institute, KarRC RAS.

Acknowledgments: We gratefully acknowledge M.A. Boychuk (Institute of Biology, KarRC RAS) for identification (verification) of moss samples.

Keywords: recreational pressure, trampling, soil, forest litter, living ground cover, flora, tree stand, digression, fine roots, root occupation.

Поступила 06.08.19 / Received on August 6, 2019

УДК 630*561.24(98)(045)

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-106-118

ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ В ИСТОРИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

П.А. Феклистов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

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

Н.М. Бызова², канд. геогр. наук, доц.; ResearcherID: [AAS-9212-2020](https://orcid.org/0000-0003-3493-092X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3493-092X>

А.И. Пашкевич³, д-р геогр. наук, проф.; ResearcherID: [AAS-3167-2020](https://orcid.org/0000-0001-8134-5999),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8134-5999>

Е.В. Сазанова², канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: [G-8650-2019](https://orcid.org/0000-0001-5731-7517),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5731-7517>

А.Н. Соболев⁴, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318),

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

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 109, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: pfeklistov@yandex.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.byzova@narfu.ru

³Университет Даларны, Высшая Школа Технологии и Бизнеса, Хогскулегатан 2, г. Фалун, SE-79188, Швеция; e-mail: alp@du.se

⁴Соловецкий музей-заповедник, Архангельская обл., пос. Соловки; e-mail: alex-sobol@mail.ru

Исследования древесины в Арктике проводились на островах Вайгач, Гуккера (Земля Франца-Иосифа) и Новой Земле. В ходе экспедиции «Арктический плавучий университет – 2013» были взяты образцы древесины (керны) из строений на ключевых участках арктических островов. По образцам древесины строили древесно-кольцевые серии и получали «плавающие хронологии», которые «привязывали» к дендрощкалам растущих деревьев с известным годом образования каждого годичного кольца. Перекрестное датирование плавающих хронологий осуществляли следующим образом. Дендрощкалу и плавающую хронологию накладывали друг на друга и рассчитывали коэффициент синхронности, затем сдвигали на 1 год и снова рассчитывали, и так сдвигали и перебирали все возможные варианты. По результатам с максимальным коэффициентом синхронности оценивали визуальное сходство и датировали годичные кольца плавающей хронологии, а по самому наружному кольцу датировали объект. Дендрохронологическим методом был определен год образования каждого годичного кольца бревен строений, что позволило предположить время их возведения, считая, что это происходило через год-два после рубки дерева. Все исследованные объекты располагались в местах с сохранившейся историей их создания, что очень важно для подтверждения объективности полученных данных. В результате исследований определены даты строительства: на о-ве Вайгач строение датируется 1945 г., на о-ве Гуккера (Земля Франца-Иосифа) – постройки 1936 г., бывшая баня на м. Желания (Новая Земля) – 1935 г., сруб дзота (там же) – 1938 г., маяк (там же) – 1952 г., сруб на берегу бух. Ледяная Гавань (Новая Земля) – 1938 г., относительно «современное» строение (там же) датируется 1991 г. Дата строительства маяка из исторических документов – 1954 г., а датирование по годичным кольцам показывает, что бревна срублены в 1952 г. и, вероятно, завезены заранее. Проведенные исследования на основе дендрохронологического метода открывают большие возможности для определения возраста безымянных деревянных объектов в Арктике.

Для цитирования: Феклистов П.А., Бызова Н.М., Пашкевич А.И., Сазанова Е.В., Соболев А.Н. Дендрохронологическое исследование древесины в исторически значимых арктических объектах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 106–118. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-106-118

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

Ключевые слова: дендрохронологический метод, дендрошкала, Арктика, объекты историко-культурного наследия, плавающая хронология.

Введение

Арктика, несмотря на удаленность и труднодоступность, имеет длительную историю освоения и исследования. По данным Морской арктической комплексной экспедиции (МАКЭ) Российского научно-исследовательского института культурного и природного наследия имени Д.С. Лихачева, только на островах архипелага Земля Франца-Иосифа обнаружен 101 объект, имеющий признаки историко-культурной ценности, из которых 65 – историко-культурные памятники, 36 – памятные места, связанные с историей изучения и освоения архипелага [4].

Суровые природные условия Арктики, отсутствие древесной растительности сыграли важную роль в выборе строительного материала для сооружения зимовий, становищ, помещений полярных станций, большинство из которых деревянные. Первоначально для этих целей первопроходцы использовали плавник, бревна, выброшенные на берег прибоем. Тяжелые климатические условия, определяющие крайне низкую активность живых организмов – разрушителей древесины, позволяют использовать выброшенные на берег бревна для построек.

В дальнейшем для строительства стали привозить разборные срубы, чаще всего сосновые [3]. Большинство строений на побережье островов в западном секторе Арктики возводились из древесины, заготовленной в северо-европейской лесной зоне, вероятнее всего на территории Архангельской губернии, откуда начинались многие арктические экспедиции. Сооружения XX в., жилые, рабочие, складские помещения полярных станций, деревянные маяки также создавались из привозной древесины, доставленной на острова морскими судами из портов Архангельской области.

В большинстве случаев датировка отдельных сохранившихся деревянных объектов в Арктике затруднена. При отсутствии строительного материала многие из них многократно перестраивались, подвергались разборке для строительства новых жилищ, использовались как топливо. Дендрохронологический метод открывает большие возможности для определения возраста древесины и времени строительства деревянных сооружений, для восстановления истории открытия и освоения Арктики [5].

Объекты и методы исследования

В основе дендрохронологического метода датировки деревянных объектов лежит сходство в динамике ширины годовичных колец у разных деревьев. Для хвойных деревьев получены сотни дендрохронологических рядов по древесине ныне живущих деревьев. Наиболее изученными являются районы Сибири,

Дальнего Востока и Средней Азии. Самые длинные по живущим деревьям ряды – по арче туркестанской в Средней Азии, 808 лет [9], по лиственнице сибирской – 1010 лет на Полярном Урале [12], 867 лет в Западной Сибири [13], 677 лет на Алтае [1]. Однако самый близкий район исследования, где получены дендрошкалы по лиственнице – Полярный Урал [22, 23].

Для определения года формирования прироста (годичных колец) бревен из арктических строений использовались дендрошкалы по соснякам с Большого Соловецкого острова, предоставленные А.Н. Соболевым, научным сотрудником Соловецкого государственного историко-архитектурного и природного музея-заповедника. При этом учитывалось, что на Севере сходство в динамике радиального прироста прослеживается на большие расстояния [19].

Дендрохронологический метод позволяет определить время формирования (год формирования) годовых колец деревьев. Датировка деревянных объектов основана на том, что у разных деревьев наиболее крупные и наиболее мелкие изменения в ширине годовых колец совпадают по времени. Это связано с адаптивной реакцией прироста на стрессовые условия и климатические факторы [10, 11, 15, 16, 20, 21, 24, 25 и др.]. По взятым образцам древесины строится древесно-кольцевая серия, или «плавающая» хронология. Плавающие хронологии «привязывают» к дендрошкалам, полученным по растущим деревьям, у которых известен возраст каждого годового кольца. Это позволяет осуществить перекрестное датирование плавающих хронологий и хронологий годовых колец современной древесины. Например, по динамике величины годовых колец бревен из стен церкви Цигенхайн в Германии было определено время ее возведения [8].

Из бревен деревянных строений на побережье арктических островов, расположенных на ключевых участках по маршруту экспедиции «Арктический плавучий университет – 2013», возрастным буравом брались образцы древесины (керна), у которых с помощью микроскопа МБС-9 измерялась ширина годового кольца. Точность измерения годовых колец $\pm 0,05$ мм. Количество образцов из одной постройки зависело от количества бревен, пригодных для анализа. По каждому деревянному объекту бралось до 10 образцов древесины. Всего были взяты образцы древесины из 32 бревен. В общей сложности было произведено измерение около 4600 годовых колец. По каждому образцу построена плавающая дендрошкала, без привязки годовых колец к определенным датам (годам).

Дендрошкалы из одной постройки на предмет выявления синхронности в изменении прироста сравнивались графически. Для более объективной оценки рассчитывался коэффициент синхронности, предложенный нами ранее [14], по формуле:

$$K = \frac{\sum_1^n |A+B|^+}{\sum_1^n |A| + |B|},$$

где A – разница в величине прироста между соседними годами в одном ряду; B – разница в величине прироста между соседними годами в другом ряду; $|A| + |B|^+$ – «вес» однонаправленных интервалов, обе разности с одним знаком; $|A| + |B|$ – общий «вес» всех интервалов, сумма абсолютных величин всех разностей.

В дендрохронологических исследованиях часто возникает необходимость сравнения дендрошквал для установления их сходства. Визуальная оценка сходства не может быть объективным критерием, поэтому использовались разные количественные показатели [2, 6, 7, 17, 18]. Однако эти показатели учитывают лишь сходство тенденций в изменении прироста и не учитывают абсолютные величины сходных изменений. Мы предлагаем использовать коэффициент синхронности, учитывающий как тенденцию изменения прироста от года к году, так и абсолютную величину отклонений [14]. Это способствует приданию «веса» наиболее крупным и заметным изменениям прироста. Данный коэффициент варьирует от 0 до 100 %. Если коэффициент менее 50 % – дендрошкалы асинхронны, если более 50 % – наблюдается синхронность дендрошквал.

Коэффициент синхронности рассчитывался для дендрошквал при наибольшем визуальном сходстве двух кривых. Затем дендрошкалы сдвигались на год, снова вычислялся коэффициент, и так далее до получения наибольшего показателя синхронности и последующей возможности датировать годовые кольца плавающей хронологии. Последний год свидетельствует о годе рубки дерева и позволяет предположить время строительства деревянных строений. Выбор деревянных строений на ключевых участках обусловлен возможностью сравнения результатов определения возраста древесины дендрохронологическим методом с временем их строительства по имеющимся архивным документам.

Результаты исследования и их обсуждение

Определение возраста годовых колец бревен из деревянных строений произведено на 4 ключевых участках: о-в Вайгач, о-в Гукера архипелага Земля Франца-Иосифа, м. Желания и побережье бух. Ледяная Гавань о-ва Северный архипелага Новая Земля. По каждому образцу построена плавающая дендрошкала без привязки годовых колец к определенным датам (годам) для последующего совмещения с дендрошкалами образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва.

На ключевом участке № 1, расположенном на м. Болванский Нос на северо-востоке о-ва Вайгач, образцы для определения возраста древесины (кern 10) взяты из деревянного строения, расположенного к северо-востоку от действующей морской гидрометеорологической полярной станции имени Е.К. Федорова. Построена плавающая дендрошкала, при совмещении которой с дендрошкалой образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва коэффициент синхронности дендрошквал составил 68 %. Последнее годовое кольцо древесины из исследуемого сруба датируется 1945 г., что позволяет предположить, что обследованное деревянное строение было построено после 1945 г. (рис. 1).

Образец древесины (кern 5) был взят из основания сгоревшего строения в северо-восточной части станции у подножия плато. Бревна представляют остатки единственного в истории станции двухэтажного здания, бывшего космического павильона, сложенного из бруса в форме правильного куба с высотой стен 9 м. По kernу 5 была получена плавающая хронология, наложение которой на дендрошкалу с Большого Соловецкого о-ва показало их синхронность с 1936 г. Коэффициент синхронности составил 72 % (рис. 2). Следовательно, для основания сруба павильона, построенного в 1952 г., использовались бревна, наружные годовые слои которых датируются серединой 30-х гг. XX в.

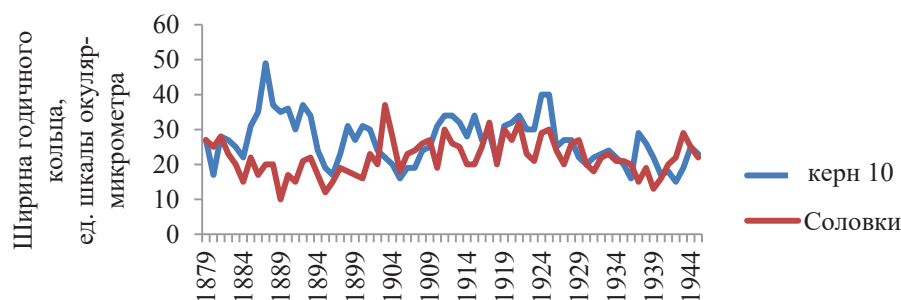


Рис. 1. Совмещенные дендрощкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и строения на о-ве Вайгач (кern 10)

Fig. 1. Combined dendroscales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and a building on Vaygach Island (core 10)

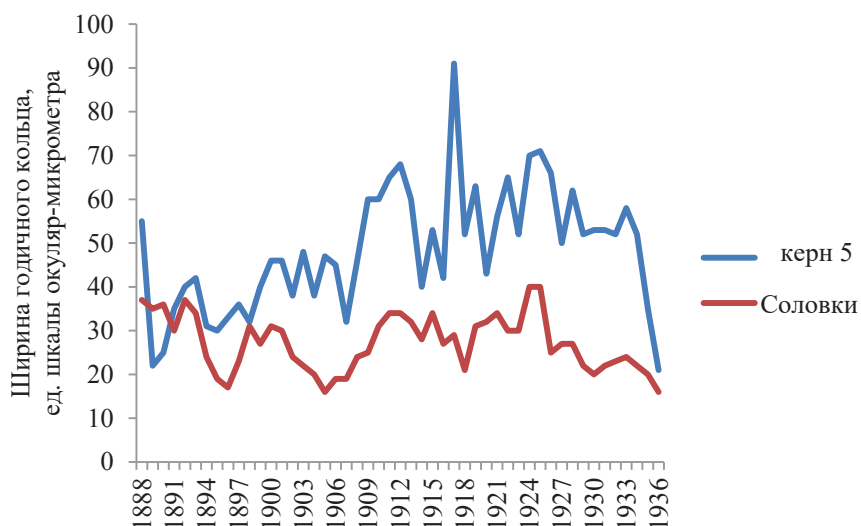


Рис. 2. Совмещенные дендрощкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и основания сгоревшего павильона на о-ве Гукера, Земля Франца-Иосифа (кern 5)

Fig. 2. Combined dendroscales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and the basement of the burnt space pavilion on Hooker Island, Franz Josef Land (core 5)

Другим объектом изучения было строение бывшей бани-прачечной. Это одно из старейших на станции помещений, возведенное в 1929 г. С балки, на которую опирается потолок бани, был взят образец древесины (кern 6). Степень синхронности дендрощкалы образцов из потолочной балки в бане-прачечной на о-ве Гукера и с Большого Соловецкого о-ва хотя и невысока (56 %), но достаточно заметна (рис. 3). Год рубки потолочной балки – 1936 г. Возможно, ее использовали при ремонте после строительства бани.

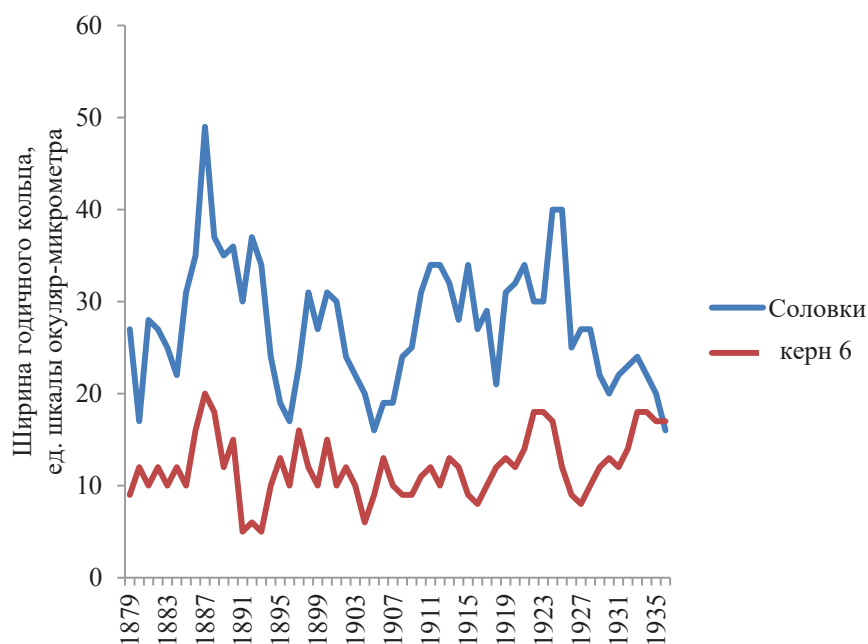


Рис. 3. Совмещенные дендрошкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и потолочной балки бани-прачечной на о-ве Гукера, Земля Франца-Иосифа (кern 6)

Fig. 3. Combined dendrochronology scales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and a ceiling beam of the bath-washhouse on Hooker Island, Franz Josef Land (core 6)

На ключевом участке № 3 на м. Желания о-ва Северный архипелага Новая Земля образцы древесины брались из различных деревянных сооружений полярной станции м. Желания, строительство которой началось в 1931 г. [3]. Одним из первых строений станции считается бывшая баня, из сруба которой был взят образец древесины (кern 3). Последние годовые кольца плавающей хронологии датируются 1935 г., степень синхронности с дендрошкалой с Большого Соловецкого о-ва – 59 % (рис. 4). Таким образом, вероятнее всего, этот объект был построен после 1935 г.

На мысе Желания о-ва Северный архипелага Новая Земля до настоящего времени сохранились военные укрепления – дзоты из бревен разной толщины. Это выкопанные в грунте небольшие блиндажи, укрепленные срубом, где были установлены крупнокалиберные пулеметы и пушка. Эти укрепления были построены в августе 1942 г., после нападения на метеостанцию немецкой подводной лодки.

Дендрошкала образца древесины из сруба дзота (кern 4) имела синхронность с дендрошкалой с Большого Соловецкого о-ва (рис. 5). Коэффициент синхронности составил 55 %. Последнее годовое кольцо датируется 1938 г. Возможно, при строительстве военных сооружений использовались ранее завезенные на полярную станцию строительные материалы.

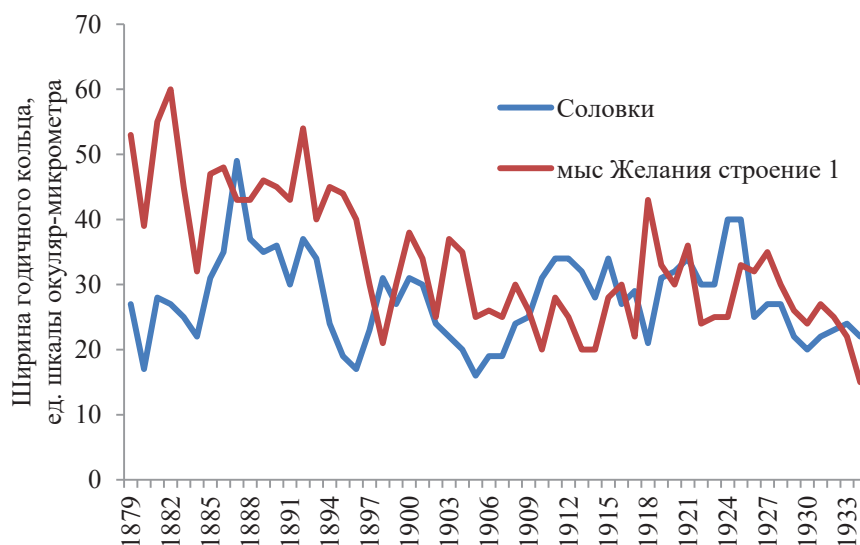


Рис. 4. Совмещенные дендрощкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и сруба бывшей бани на м. Желания о-ва Северный, Новая Земля (кern 3)

Fig. 4. Combined dendroscales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and the frame of the former bathhouse at Cape Zhelaniya, Severny Island, Novaya Zemlya (core 3)

Не менее уникален деревянный маяк на возвышенной площадке мыса Желания о-ва Северный архипелага Новая Земля. Маяк установили в 1956 г. в 80 м от обрывистого берега. Конструкция маяка представляет собой каркас из бревен, соединенных между собой металлическими скобами. Общая высота маяка – 13 м.

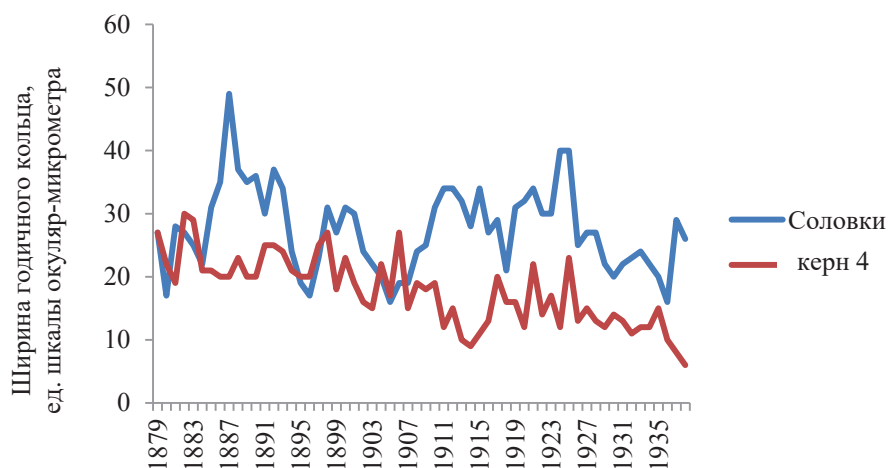


Рис. 5. Совмещенные дендрощкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и сруба дзота на м. Желания о-ва Северный, Новая Земля (кern 4)

Fig. 5. Combined dendroscales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and the pillbox frame at Cape Zhelaniya, Severny Island, Novaya Zemlya (core 4)

Дендрошкала образца древесины, взятого из бревна в основании маяка (кern 7), имеет 60 % синхронности с дендрошкалой с Большого Соловецкого о-ва. Последние годовичные кольца датируются 1952 г. Следовательно, при строительстве маяка использовались новые материалы, доставленные на остров перед его началом (рис. 6).

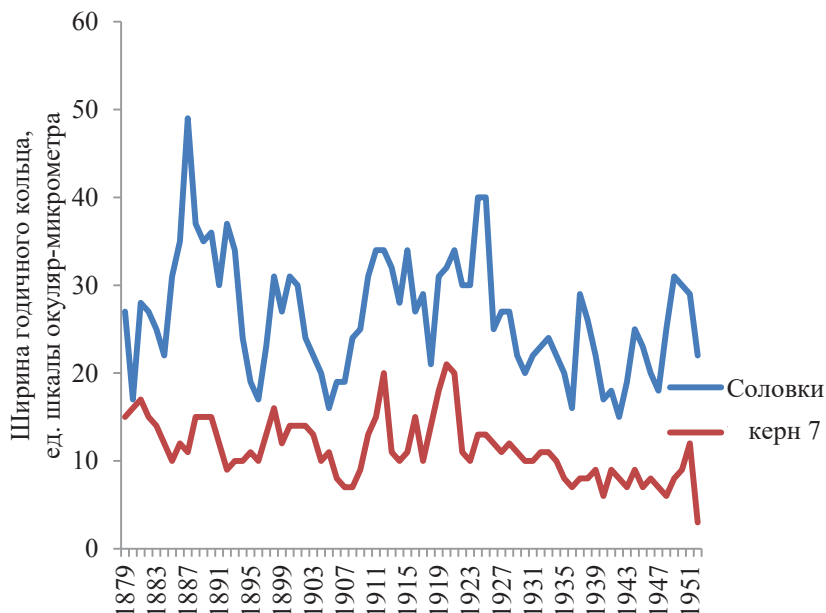


Рис. 6. Совмещенные дендрошкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и бревен основания маяка на м. Желания о-ва Северный, Новая Земля (кern 7)

Fig. 6. Combined dendroscales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and logs of the lighthouse basement at Cape Zhelaniya, Severny Island, Novaya Zemlya (core 7)

Ключевой участок № 4 расположен в южной части побережья бух. Ледяная Гавань на северо-востоке о-ва Северный архипелага Новая Земля. Здесь в 1597–1598 гг. провел последнюю зимовку В. Баренц. Это историческое место с 1979 по 2009 г. после экспедиций Э. Карлсена (1871 г.) и Б.В. Милорадовича (1933 г.) посещалось участниками экспедиции Д.Ф. Кравченко, которые возвели на побережье два строения [24].

Первый образец древесины (кern 7) был взят из бревна сруба незаконченного строения. Возраст последних годовичных колец образцов древесины датируется 1938 г. (рис. 7). Коэффициент синхронности дендрошкал образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и древесины из сруба недостроенного строения составил 58 %.

На берегу бух. Ледяная Гавань, чуть дальше от берега и от недостроенного сруба находится относительно «современное» строение, крыша которого покрыта армированной полиэтиленовой пленкой, окна заколочены, а на дверях висит замок. Рядом лежат «свежие» доски, сложенные в штабель.

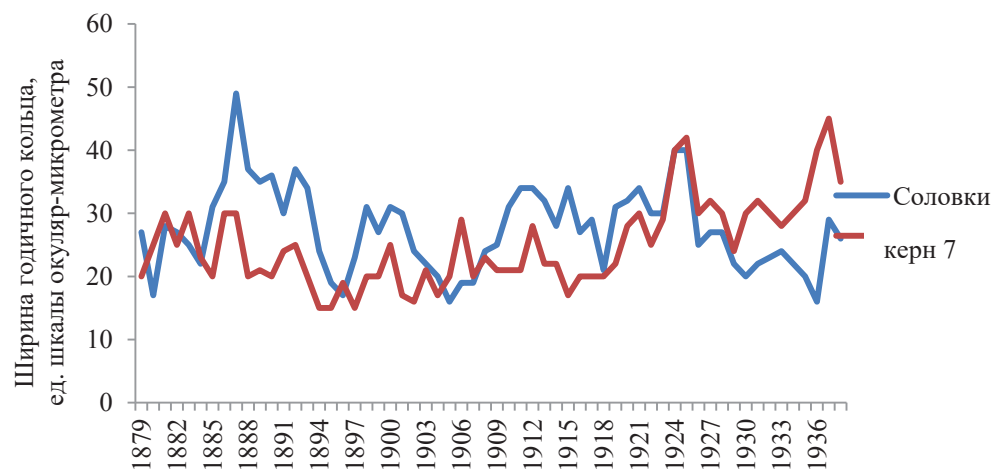


Рис. 7. Совмещенные дендрощкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и недостроенного строения на побережье бух. Ледяная Гавань на о-ве Северный, Новая Земля (кern 7)

Fig. 7. Combined dendroscales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and the half-finished building on the coast of Ledyanaya Gavan' Bay, Severnyy Island, Novaya Zemlya (core 7)

Была сделана попытка оценить примерное время постройки данного строения. Степень синхронности дендрощкалы образца древесины (кern 3) и образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва составила 65 %. Возраст последних годовичных колец образца древесины датируется 1991 г. (рис. 8).

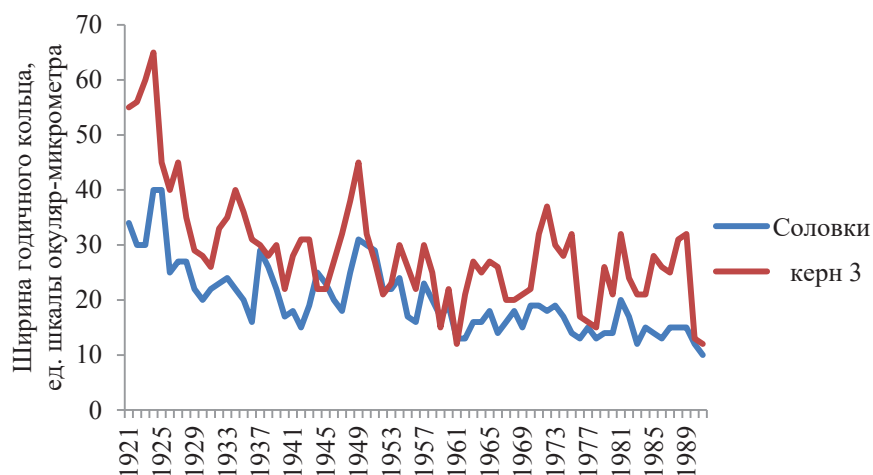


Рис. 8. Совмещенные дендрощкалы образцов древесины с Большого Соловецкого о-ва и достроенного строения на побережье бух. Ледяная Гавань на о-ве Северный, Новая Земля (кern 3)

Fig. 8. Combined dendroscales of wood samples from Bolshoy Solovetsky Island and a completed building on the coast of Ledyanaya Gavan' Bay, Severnyy Island, Novaya Zemlya (core 3)

Существенные различия возраста древесины из срубов на побережье бух. Ледяная Гавань (1938 г. и 1991 г.) позволяют предположить, что для их возведения участники экспедиции в 2009 г. использовали разновозрастные бревна из плавника, которые в большом количестве встречаются на ее берегу.

Заключение

Исследования, проведенные на арктических островах в период экспедиции «Арктический плавучий университет – 2013», представляют собой эксперимент по применению дендрохронологического метода датирования годичных колец бревен из деревянных строений с целью определения времени их постройки. Выбор ключевых участков в местах с сохранившейся историей их создания обусловлен проверкой полученных результатов, что очень важно для подтверждения их объективности.

Проведенные на основе дендрохронологического метода исследования открывают большие возможности при определении возраста безымянных деревянных объектов в Арктике. На арктических островах сохранились остатки деревянных строений, время строительства которых неизвестно. Эти «безымянные» свидетели очень важны для восстановления истории освоения Арктики и являются ценными объектами историко-культурного наследия.

Дендрохронологический метод определения возраста древесины строений позволяет установить возможное время их сооружения, выявить их значимость в истории арктических открытий, необходимость и возможность реконструкции для сохранения и практического использования в качестве объектов историко-культурного наследия при организации арктических туристических маршрутов.

В результате определены даты строительства: на о-ве Вайгач строение датируется 1945 г., на о-ве Гуккера (Земля Франца-Иосифа) – постройки 1936 г., бывшая баня на м. Желания (Новая Земля) – 1935 г., сруб дзота (там же) – 1938 г., маяк (там же) – 1952 г., сруб на берегу бух. Ледяная Гавань (Новая Земля) – 1938 г., относительно «современное» строение (там же) датируется 1991 г. Дата строительства маяка из исторических документов 1954 г., а датирование по годичным кольцам показывает, что бревна были срублены в 1952 г. и они, вероятно, были завезены заранее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адаменко М.Ф. Динамика прироста лиственницы как индикатор термического режима летних сезонов в Горном Алтае // Региональные географические исследования в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1978. С. 20–23. [Adamenko M.F. Dynamics of Larch Increment as an Indicator of the Thermal Regime of Summer Seasons in the Altai Mountains. *Regional Geographic Research in Western Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, pp. 20–23].

2. Битвинская Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 172 с. [Bitvinskaya T.T. *Dendroclimatic Research*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 172 p.].

3. Боярский П.В. История освоения арктического архипелага Новая Земля: моногр. / под общ. ред. К.С. Зайкова. Архангельск: САФУ, 2015. 100 с. [Boyarskiy P.V. *The History of Development of the Arctic Archipelago of Novaya Zemlya*: Monograph. Ed. by K.S. Zaykov. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 100 p.].

4. Гаврило М., Ермолов Е. Проблемы выявления и сохранения историко-культурного наследия Арктики: пример с Земли Франца-Иосифа // Охраняется государством. 2015. № 3. С. 16–35. [Gavrilo M., Ermolov E. Problems of Identification and Preservation of Historical and Cultural Heritage of the Arctic: Case Study from Franz Josef Land. *Okhranyayetsya gosudarstvom*, 2015, no. 3, pp. 16–35].

5. Еремеев И.И., Дзюба О.Ф. Очерки исторической географии лесной части Пути из варяг в греки // Археологические и палеогеографические исследования между Западной Двиной и озером Ильмень. СПб.: Нестор-История, 2010. С. 158–161. [Eremeev I.I., Dzyuba O.F. Essays on Historical Geography of the Forest Part of the Trade Route from the Varangians to the Greeks. *Archaeological and Paleogeographic Studies between the Western Dvina and Lake Ilmen*. Saint Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2010, pp. 158–161].

6. Комин Г.Е. Цикличность в динамике прироста деревьев и древостоев сосны таежной зоны Западной Сибири // Изв. СО АН СССР. Сер.: Биол. науки. 1970. № 15. Вып. 3. С. 36–44. [Komin G.E. Cyclicality in the Dynamics of Increment of Pine Trees and Stands of the Taiga Zone of Western Siberia. *Izvestiya sibirskogo otdeleniya akademii nauk SSSR. Seriya biologicheskikh nauk*, 1970, , iss. 3, no. 15, pp. 36–44].

7. Комин Г.Е., Пьянков Ю.А., Шиятов С.Г. Определение сходства между дендрохронологическими рядами // Экология. 1973. № 4. С. 29–34. [Komin G.E., P'yankov Y.A., Shiyatov S.G. Assessment of Similarities of Dendrochronological Series. *Ekologia [Soviet Journal of Ecology]*, 1973, vol. 4, no. 4, pp. 29–34].

8. Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 421 с. [Lir Kh., Pol'ster G., Fidler G. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 421 p.].

9. Ловелиус Н.В. Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 232 с. [Lovelius N.V. *Variability of Trees Increment. Dendroindication of Natural Processes and Anthropogenic Influences*. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 232 p.].

10. Пинаевская Е.А. Влияние климатических параметров на формирование радиального прироста сосны на северной границе ареала Европейского Севера России // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 2(137). С. 208–214. [Pinaevskaya E.A. The Influence of Climatic Parameters on the Formation of Radial Growth of the Pine on the North Border of the Area of European North of Russia. *Vestnik KrasGAU [The Bulletin of KrasGAU]*, 2018, no. 2(137), pp. 208–214].

11. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Адаптивные реакции морфологических форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) в стрессовых условиях северной тайги (на примере Северо-Двинского бассейна) // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 4. С. 425–437. [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). *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 425–437]. DOI: [10.15372/SEJ20180404](https://doi.org/10.15372/SEJ20180404)

12. Шиятов С.Г. Сверхвековой цикл в колебаниях индексов прироста лиственницы (*Larix sibirica*) на полярной границе леса // Биоэкологические основы дендрохронологии: материалы к симп. XII-го Междунар. ботан. конгресса, Ленинград, июль 1975. Вильнюс-Ленинград, 1975. С. 47–53. [Shiyatov S.G. Supersecular Cycle in Fluctuations in the Growth Indices of Larch (*Larix sibirica*) at the Polar Border of the Forest. *Bioecological Foundations of Dendrochronology: Materials to the Symposium of the 12th International Botanical Congress. Leningrad, July, 1975*. Vilnius, 1975, pp. 47–53].

13. Шиятов С.Г. Дендрохронологические ряды Северо-Востока европейской части СССР // Дендроклиматологические шкалы Советского Союза. Ч. II. Каунас, 1981. С. 80–86. [Shiyatov S.G. Dendrochronological Series of Northeast of the European Part of the USSR. *Dendroclimatological Scales of the Soviet Union. Part 2*. Kaunas, 1981, pp. 80–86].

14. Феклистов П.А. К методике установления сходства дендрохронологических рядов // Тез. докл. III Всесоюз. конф. «Дендроклиматические исследования в СССР». Архангельск: АЛТИ, 1978. С. 71–72. [Feklistov P.A. On the Method of Recognizing Similarities of Dendrochronological Series. *Abstracts of the 3rd All-Union Conference "Dendroclimatic Research in the USSR"*. Arkhangelsk, ALTI Publ., 1978, pp. 71–72].
15. Bréda N., Badeau V. Forest Tree Responses to Extreme Drought and Some Biotic Events: Towards a Selection according to Hazard Tolerance? *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, vol. 340, iss. 9-10, pp. 651–662. DOI: [10.1016/j.crte.2008.08.003](https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.003)
16. Dobbertin M.K., Braecker O.U. Tree Rings and People. *International Conference on the Future of Dendrochronology*. Switzerland, WSL, 2001, pp. 252–253.
17. Glock W.S. A Rapid Method of Correlation for Continuous Time Series. *American Journal of Science*, 1942, vol. 240, no. 6, pp. 437–442. DOI: [10.2475/ajs.240.6.437](https://doi.org/10.2475/ajs.240.6.437)
18. Huber B. Über die Sicherheit jahrringschronologischer Datierung. *Holz als Roh- und Werkstoff* [European Journal of Wood and Wood Products], 1943, Bd. 6, N. 10/12, S. 263–268. DOI: [10.1007/BF02603303](https://doi.org/10.1007/BF02603303)
19. Hustich J. Correlation of Tree-Ring Chronologies of Alaska, Labrador and Northern Europe. *Acta Geographica*, 1956, vol. 15, no. 3, pp. 3–26.
20. Kempes C.P., Myers O.B., Breshears D.D., Ebersole J.J. Comparing Response of *Pinus edulis* Tree-Ring Growth to Five Alternate Moisture Indices Using Historical Meteorological Data. *Journal of Arid Environments*, 2008, vol. 72, iss. 4, pp. 350–357. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2007.07.009](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.07.009)
21. Linderholm H.M., Moberg A., Grudd H. Peatland Pines as Climate Indicators? A Regional Comparison of the Climatic Influence on Scots Pine Growth in Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 32, no. 8, pp. 1400–1410. DOI: [10.1139/x02-071](https://doi.org/10.1139/x02-071)
22. Mazepa V.S. Stand Density in the Last Millennium at the Upper Tree-Line Ecotone in the Polar Ural Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 9, pp. 2082–2091. DOI: [10.1139/x05-111](https://doi.org/10.1139/x05-111)
23. Shiyatov S.G. Rates of Change in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Ural Mountains. *PAGES News*, 2003, vol. 11, no. 1, pp. 8–10. DOI: [10.22498/pages.11.1.8](https://doi.org/10.22498/pages.11.1.8)
24. Vitas A. Dendroclimatological Research of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Baltic Coastal Zone of Lithuania. *Baltic Forestry*, 2004, vol. 10, no. 1, pp. 65–71.
25. Yarmishko V.T. Radial Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Varied Environment Influenced by Air Pollution in the European North of Russia. *Forestry Ideas*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 375–383.

DENDROCHRONOLOGICAL STUDIES OF WOOD AT HISTORICALLY SIGNIFICANT SITES OF THE ARCTIC

P.A. Feklistov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

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

N.M. Byzova², Candidate of Geography, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAS-9212-2020](https://orcid.org/0000-0003-3493-092X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3493-092X>

A.I. Pashkevich³, Doctor of Geography, Prof.; ResearcherID: [AAS-3167-2020](https://orcid.org/0000-0001-8134-5999),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8134-5999>

E.V. Sazanova², Candidate of Economics, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-8650-2019](https://orcid.org/0000-0001-5731-7517),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5731-7517>

A.N. Sobolev⁴, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318),

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

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UB RAS, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: pfeklistov@yandex.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: n.byzova@narfu.ru

³School of Technology and Business Studies, Dalarna University, Högskolégatan 2, Falun, SE-791 88, Sweden; e-mail: alp@du.se

⁴Solovki State Historical, Architectural and Natural Museum-Reserve, pos. Solovki, Arkhangelsk Region, 164070, Russian Federation; e-mail: alex-sobol@mail.ru

Studies of wood in the Arctic were carried out on Vaygach Island, Hooker Island (Franz Joseph Land) and Novaya Zemlya. During the expedition “Arctic Floating University – 2013”, wood samples (cores) were taken from the buildings in key areas of the Arctic islands. Conforming to the wood samples we constructed tree-ring series and obtained floating chronologies, which were linked to dendroscales of standing trees with known year of each annual ring formation. Crossdating of floating chronologies was performed as follows. Dendroscale and floating chronology were overlapped and the synchronicity coefficient was calculated, then the dendroscale was shifted for a year and the coefficient was calculated again; the procedure was repeated until all possible options were checked. Visual similarity was assessed and the annual rings of floating chronology were dated based on the results with the maximum synchronicity coefficient, and the object was dated by the outermost ring. The year of formation of each annual ring of the buildings logs was determined by the dendrochronological method, resulting in assumption of the time of their construction, taking into account that it occurred a year or two after the tree felling. All the studied objects were located in areas with preserved history of their creation, which is highly important for confirming the objectivity of the obtained results. The dates of the buildings were determined as follows: Vaigach Island, 1945; Hooker Island (Franz Josef Land), 1936; the former bathhouse on Cape Zhelaniya (Novaya Zemlya), 1935; timber from the pillbox, 1938; the lighthouse, 1952; the frame on the coast of Ledyanaya Gavan’ Bay (Novaya Zemlya), 1938; a relatively modern building on the coast of the bay, 1991. Interesting to note that according to the obtained historical records the Lighthouse was built in year 1954, while dating by annual rings shows that the logs were in 1952 and they were probably imported in advance. The years for the construction research based on the use of the dendrochronological method opens up great opportunities at determining the age of unnamed wooden in the Arctic.

For citation: Feklistov P.A., Byzova N.M., Pashkevich A.I., Sazanov E.V., Sobolev A.N. Dendrochronological Studies of Wood at Historically Significant Sites of the Arctic. *Lesnoy zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 106–118. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-106-118

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, UB RAS (project No. 0409-2019-0039; No. ГП AAA -A18-118011690221-0).

Keywords: dendrochronological method of study, dendroscales, the Arctic, historical and cultural heritage sites, floating chronology.

Поступила 14.08.19 / Received on August 14, 2019

УДК 630*232.13+630*181.351

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-119-130

EVALUATION OF ECOLOGICAL PLASTICITY AND STABILITY OF SOME PROMISING VARIETIES OF POPLARS**A.P. Tsarev¹, Doctor of Agriculture, Prof.;** *ResearcherID:* [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>**V.A. Tsarev¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;***ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>**R.P. Tsareva¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;***ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>**N.V. Laur², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;***ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-1989-0384>¹All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation;

e-mail: antsa-55@yandex.ru, vad.tsareff@yandex.ru, tsarais42@mail.ru

²Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; e-mail: laur@petsu.ru

When developing promising assortments of forest woody plants, it is important to take into account not only their growth and survival in some particular environment, but also their respond to change in growing conditions. In this regard, the purpose of this work is to evaluate the ecological plasticity and stability of some poplar varieties promising for the south-eastern part of European Russia and Ukraine using the Eberhart and Russell method. The research was carried out on three testing sites: upland environment of the forest-steppe zone of the Voronezh region; floodplain environment of the dry steppe zone of the Volgograd region; and floodplain environment of the steppe zone of the Donetsk region. Five promising poplar varieties were identified and studied at each of the experimental sites. The indices of survival, growth in height and diameter, trunk volumes, and productivity by wood stocks and average increments are presented for each variety. Due to the average increments change with age, the ontogeny period from 21 to 30 years was chosen for the study, during which the average survival of poplars varies slightly. It was found that *Regenerata*, which is characterized by average plasticity and the lowest stability, was the most productive of the studied poplar varieties. It can perform high productivity only in the favorable environment. The poplar variety *Pioneer* demonstrated the least plasticity. Its productivity did not vary too much with change in growth conditions at average ecological stability. The highest plasticity at average ecological stability was observed in the *Vernirubens* variety. Average plasticity and stability were observed in poplar *E.s.-38*. The poplar variety *Marilandica* was also characterized by average plasticity, and high ecological stability. The research results allow using of the studied varieties more rational in different growing conditions, with regard to their environmental characteristics.

For citation: Tsarev A.P., Tsarev V.A., Tsareva R.P., Laur N.V. Evaluation of Ecological Plasticity and Stability of Some Promising Varieties of Poplars. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 119–130. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-119-130

Keywords: poplar varieties, survival, growth, productivity, ecological plasticity, ecological stability, Eberhart and Russell method.

Introduction

Most species of the genus *Populus* L. are fast-growing woody plants. In low-forest regions of the world, poplars are the most promising species of woody plants that can quickly fill the existing shortage of wood. That was the reason for their wide reproduction and breeding in many countries of the world.

Some experiments on poplar breeding were conducted in different countries, but the first extensive practical work on hybridization of poplars for the purposes of the pulp and paper industry was carried out by American researchers A. Stout, R. McKee, and E. Schreiner. In these studies, 13 thousand hybrid seedlings were obtained; 69 promising forms were selected for further testing [42].

An extensive summary report on poplar culture and breeding in the Netherlands, Germany and other Western European countries was presented by G. Houtzagars [35, 36] and H. Günther [31]. At the same time, H. Günther gave not only a general description of some isolated forms of poplars, in particular euramerican hybrids of black poplars, but also hypothesized their origin.

Taking into account the great economic importance of poplars, the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) created in 1947 the International Poplar Commission (IPC) with the tasks of comprehensive research of this species, development of promising varieties, technologies for its cultivation and use. This is the only tree species for which such a division of the FAO has been established. Currently, IPC includes 38 countries, either heavily- or low-forested, but countries with advanced economies (USA, Canada, Germany, England, France, Italy, Spain, Japan, China, India, Turkey, etc.). Unfortunately, Russia is not one of them.

Over the years of its existence, IPC has published three large summarizing reports on the systematics, breeding, environmental sustainability and culture of poplars in different countries of the world, as well as on their rational use [39, 40, 41]. In addition to these reports on poplar, works on various problems were published in different countries. It is impossible to list all of them, but some that investigate the issues of breeding and hybridization are worth mentioning. These are foreign publications [27, 30, 34, 45], as well as works of Russian researchers with aspen [6, 7], white [4, 10], black pyramidal [1, 15, 26], balsamic [2, 3, 7] and other poplars [19, 21, 22].

In the former USSR, starting from the 1950's–60's, in various site conditions, test poplar cultures were laid out. After many years of testing, promising recommended assortments were selected and even developed for different positions. So, in the Leningrad region such work was carried out by P.L. Bogdanov [3], in the Moscow region – A.S. Yablokov [26], in the Central forest-steppe and steppe – M.M. Veresin, S.P. Ivannikov, S.A. Rostovtsev and A.P. Tsarev [4, 6, 13, 20], in the Volgograd region – A.V. Albensky, R.P. Tsareva and V.A. Tsarev [1, 25] in the Urals – N.A. Konovalov [7], in Uzbekistan – G.P. Ozolin [10], in Kazakhstan – P.P. Besschetnov [2], in Ukraine – N.V. Starova, A.P. Tsarev et al. [15, 23]. For various purposes, such work was carried out in other regions too [13, 21, 22, 24].

However, once developed an excellent assortment requires constant updating, due to several factors, the main of which listed below.

As civilization develops, the requirements for wood raw materials change from time to time. Such as for instance, in recent decades, more and more woody biomass is required for the development of bioenergy of renewable resources. In other words, varieties and technologies that can give the maximum volume of initial production within the shortest possible time come to the fore [33, 34]. Approaches to landscape gardening are changing. Some places require alley planting, solitary trees or pyramidal forms, and others require spreading and weeping forms, etc.

It is necessary to consider that during ontogenesis certain failures of varieties show through due to the appearance of new or introduced quarantine diseases and

pests to which local varieties are not adapted. This happened with the most heavy-productive variety of poplar in Italy I-214. Due to its high quality it became widely used in various countries of Western Europe (its share in the total poplar cultivation reached 30 % and more). But suddenly there was an outbreak of a disease caused by the pathogen *Marssonina brunnea* [38], which became a disaster for this poplar. It was necessary to urgently develop work on breeding new varieties resistant to this disease.

The varieties bred, tested and shown excellent results in one region do not always fulfill the expectations in other regions. Thus, in the Central Chernozem Region the magnificent Italian varieties of black poplars could not withstand winter frosts, and winter-hardy poplar hybrids bred by P.L. Bogdanov in Leningrad were not drought-resistant [19, 24].

In accordance with the world practice, especially after the disaster of the 1960's in Western Europe, associated with the disease *Marssonina brunnea*, technologies for creating poplar plantations from a set of many different varieties with similar practical properties, but with different genotypic structure were adopted. In particular, O. Lange [37] recommended creating plantings not from a single variety, but from 30–50 clonal varieties that are homogeneous in growth strength, ecological stability and morphological similarity, but distinguished by genotypic composition.

Considering the above mentioned, when cultivating poplars, like other woody and non-woody plants, it is necessary to take into account not only their productivity, but also ecological plasticity and stability. This is precisely what is missed in many cases due to the need for long-term, and often, multi-regional research. Research in this direction has relevance and novelty.

There are a number of methods for evaluation of ecological stability and plasticity of plant varieties which were developed by G. Wricke [44], S. Eberhart and W. Russell [29], G. Tai and D. Young [43], M.A. Fedin and D.Ya. Silis [18], V.G. Potanin et al. [12]. The analysis of some of these methods conducted by Novosibirsk researchers V.G. Potanin, A.F. Aleynikov and P.I. Styopochkin showed that each of them has advantages and disadvantages [12].

In our country, the method of Eberhart and Russell was often used. It was considered in detail by V.Z. Pakudin [11] and used by different researchers for evaluating the ecological stability and plasticity of different plants in different regions [8, 9, 16]. However, for poplars it was only used in the Astrakhan semi-desert [19]. Therefore, in this paper, we have tried for the first time to extend the application of this method.

The purpose of our work was to evaluate the ecological plasticity and stability of some promising poplar varieties for the South-Eastern part of European Russia and Ukraine using the Eberhart and Russell method and to determine their suitability for practical use in various cultivation conditions.

Research objects and methods

To evaluate the ecological plasticity and stability, three variety testing sites were selected. One of them located in the upland conditions of the Voronezh region and the others in the floodplain conditions of the Volgograd and Donetsk regions. On these sites, for evaluation of the level of ecological stability, five of the same promising varieties were selected. Among them there are three euramerican hybrids

of black poplars: Vernirubens (*Populus* × *euramericana* (Dode) Guinier cv. 'Vernirubens'), Marilandica (*Populus* × *euramericana* (Dode) Guinier cv. 'Marilandica') and Regenerata-79 (*Populus* × *euramericana* (Dode) Guinier cv. 'Regenerata'); as well as two domestic hybrids: Pioneer (*Populus pyramidalis* L. × *Populus nigra* L.) bred by A.S. Yablokov [26] and E.s.-38 (*Populus deltoides* Marsh. × *Populus balsamifera* L.) bred by M.M. Veresin, who named it as Voronezhsky Giant [4, 26].

In the Voronezh region research was carried out on the Semiluky populetum laid out in 1974 by A.P. Tsarev in accordance with the methods of field testing [5, 28]. Pre-planting preparation of soil was in the fall plowing to a depth of 30 cm. Planting was carried out with stem cuttings of different varieties and clones of poplars; 84 representatives of different sections of poplars were introduced to the site [19].

The site area was 4.6 ha, the size was 296×155 m. The soil is leached chernozem (black soil). The terrain is a weak water-dividing slope to the Veduga river. The groundwater level was 4–5 m. The forest site type is D_2 , according to the integrated scheme of P.S. Pogrebnyak and P.P. Kozhevnikov, which means that the soil is fertile (grey forest and chernozem) and slightly moist. Plant spacing was 5×4 m. The experiment was carried out in 4 replications. Plot allocation in replications was randomized. There were 6 ramets (one clone plants) on the plot. So, each clone or variety was represented by 24 plants on an area of 480 m². Materials of field observations of 25-year old trees were used for this site.

In the Volgograd region, the study object was pilot-production crop testing site laid out in 1988 by R.P. Tsareva together with employees of the Podtelkovsky forestry in the floodplain of the Kumylga River. The soil is intrazonal floodplain chernozem-meadow layered-grained heavy loam. The area of the plot is 2.0 ha. Planting is carried out by 1-year old rooted seedlings with plant spacing of 4×4 m. Each variety is represented by at least two replications. Eighteen different clones and varieties of poplar were planted on the site, 30–70 copies of each. The studied varieties were represented as follows: Vernirubens, 49 copies; Marilandica, 31 copies; Pioneer, 44 copies; Regenerata, 38 copies; and E.s.-38, 70 copies [25]. Materials of field observations of 29-year old trees were used for this site.

In the Donetsk region research was carried out on the variety testing site laid out in 1977 by A.P. Tsarev together with employees of the Fedorovsky forest district of the Zhdanov (now Mariupol) forestry pertaining to the Donetsk Forestry Management Department in Urochishche Ksenevka (no. 50), located in the floodplain of the Karatysh River. The forest site type is E_{2-3} , according to the integrated scheme of P.S. Pogrebnyak and P.P. Kozhevnikov, which means that the soil is low-fertile (degraded chernozem and transitional to them slightly alkalized loams), slightly moist and moist. The occurrence of ground water varied from optimal (1.0–1.5 m) to complete swamping. Comparative studies were carried out on the part of the site with optimal groundwater occurrence. The total area of the site was 1.2 ha, including the accounting area of 0.61 ha (135×45 m). Plant spacing is 3×3 m. The total number of plants was 1,215 pcs, including 675 accounting plants. The planting pattern was the method of complete random blocks. Plot allocation on the site and the mixing of plants on the plot were randomized. There were 3 replications. Planting was carried out with stem cuttings 20 cm long. The number of plants in the plot was 25 pcs. Into the test 9 clones and varieties of poplars were introduced [23]. Materials of field observations of 21-year old trees were used for this site.

Plant survival, growth dynamics in height (at an early age using a measuring pole, and then – using the German Blume Leiss altimeter) and diameter at breast height (1.3 m) were established by complete enumeration of trees. Trunk volumes were determined by volume tables for poplar [32].

Wood stock was determined by summing up the actual volumes of survived trees of each variety or clone on each plot for each replication and converting the resulting stock value to the area of 1 ha using the equation (1):

$$W = \frac{W' \cdot 10,000}{S_p}, \quad (1)$$

where W – calculated wood stock, m^3/ha ; W' – actual wood stock on the plots, obtained as the sum of stocks on each plot, m^3 ; S_p – total area of all plots of each variety, m^2 ; 10,000 – area of a hectare, m^2 .

Standard valuation and mathematical methods as well as Microsoft Excel program were used for data processing [5, 14, 17].

The average increments in stocks of stem wood were determined based on these indicators. Since the stands were of different ages, the average increments in wood stocks were used to evaluate the ecological stability. According to our data [24], the average increments of poplars in the period of ontogenesis from 20 to 30 years vary slightly, so their use in this study is quite acceptable.

The method of Eberhart and Russell, according to which the ecological plasticity and stability of the studied varieties were evaluated, uses two main parameters:

- Coefficient of productivity regression for changes in environmental conditions, which allows characterizing of varieties by their plasticity;
- The standard deviation of actual productivity indices from the regression line, which characterizes the stability of productivity in different environmental conditions.

In general, this method is expressed by the following dependency (equation 2):

$$X_{ij} = \bar{X}_i + r_i I_j + d_{ij}, \quad (2)$$

where X_{ij} – productivity of the i -th variety in the j -th testing site; $i = 1, 2, 3, \dots, V$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$; \bar{X}_i – average productivity of the i -th variety for all testing sites; r_i – the regression coefficient of the i -th variety on changing of wood stock productivity (see equation 4); I_j – index of environmental conditions for the j -th testing site (see equation 3); d_{ij} – deviation from the regression line of the i -th variety in the j -th testing site.

Additional details of the method are presented in the discussion of research results.

Research results and discussion

The average indices of survival, height and diameter of the studied varieties in different environmental conditions are shown in table 1.

Table 1

Survival and growth of poplars in different environmental conditions

Poplar varieties	Survival and growth indices	Testing sites		
		Semiluky populetum, Voronezh region	Kumylga, Volgograd region	Ksenevka, Donetsk region
Vernirubens	Survival, %	88	79	92
	Height, m	31.7±0.83	24.7±0.74	27.0±0.32
	Diameter, cm	38.1±1.71	28.8±1.97	31.7±0.92
Marilandica	Survival, %	88	77	86
	Height, m	28.7±0.43	24.0±0.45	26.2±0.44
	Diameter, cm	40.4±1.25	27.5±1.17	30.6±1.14
Regenerata-79	Survival, %	71	89	85
	Height, m	33.6±0.64	24.2±0.46	27.3±0.37
	Diameter, cm	48.0±1.24	27.7±1.12	32.0±1.03
Pioneer	Survival, %	50	70	74
	Height, m	33.6±0.78	24.8±0.63	23.1±0.37
	Diameter, cm	40.5±1.99	30.6±1.65	27.8±0.77
E.s.-38	Survival, %	100	88	98
	Height, m	28.5±0.25	24.5±0.36	25.5±0.24
	Diameter, cm	36.6±1.05	28.1±1.04	29.6±0.48

Data on average trunk volumes, wood stocks and stock increments were calculated (table 2), according to the indices shown in table 1. To evaluate the ecological stability of the average increment using equation 2, its components were found.

Thus, the calculated average value of actual average increments of poplars in the interval of ontogeny from 20 to 30 years (\bar{X}_t) for the Vernirubens variety was 28.3 m³/ha/year, for Marilandica it was 25.6 m³/ha/year, for Pioneer – 19.2 m³/ha/year, for Regenerata – 32.8 m³/ha/year and for E.s.-38 – 26.0 m³/ha/year.

Table 2

Productivity indices of poplars in different environmental conditions

Poplar varieties	Productivity indices	Testing sites		
		Semiluky populetum, Voronezh region	Kumylga, Volgograd region	Ksenevka, Donetsk region
Vernirubens	Trunk volume, m ³	1.39	0.62	0.83
	Wood stock, m ³ /ha	612	612	840
	Average increment, m ³ /ha/yr	24.5	20.4	40.0
Marilandica	Trunk volume, m ³	1.42	0.56	0.75
	Wood stock, m ³ /ha	624	539	711
	Average increment, m ³ /ha/yr	25.0	18.0	33.8
Regenerata-79	Trunk volume, m ³	2.22	0.59	0.86
	Wood stock, m ³ /ha	976	634	804
	Average increment, m ³ /ha/yr	39.0	21.1	38.3
Pioneer	Trunk volume, m ³	1.64	0.65	0.55
	Wood stock, m ³ /ha	410	604	445
	Average increment, m ³ /ha/yr	16.4	20.1	21.2
E.s.-38	Trunk volume, m ³	1.14	0.69	0.68
	Wood stock, m ³ /ha	569	604	737
	Average increment, m ³ /ha/yr	22.8	20.1	35.1

The index of environmental conditions for the j -th testing site (I_j) is calculated using equation 3:

$$I_j = \frac{\sum_i X_{ij}}{V} - \frac{\sum_i \sum_j X_{ij}}{V \cdot n}, \quad (3)$$

where V – number of testing varieties, $V = 5$; n – number of testing sites, $n = 3$.

Calculations have shown that for the Semiluky populetum testing site $I_1 = -0.9$; for the Kumylga testing site $I_2 = -6.4$ and for the Ksenevka testing site $I_3 = +7.3$.

Based on the fact that the higher index of environmental conditions, the more favorable environmental conditions for the testing varieties, the most favorable for poplars were the Ksenevka environmental conditions in the Donetsk region. The average environmental conditions can be attributed to Semiluky populetum and the least favorable for growth of poplars were the environmental conditions of the Kumylga testing site, located in the dry-steppe zone of the European Russia.

The regression coefficient of the i -th variety for the change in the average increment r_i was calculated using equation 4:

$$r_i = \frac{\sum_j X_{ij} I_j}{\sum_j I_j^2}. \quad (4)$$

The calculations have shown that for the Vernirubens variety $r_1 = 1.466$, for Marilandica $r_2 = 1.147$, for Regenerata $r_3 = 1.148$, for Pioneer $r_4 = 0.106$ and for E.s.-38 $r_5 = 1.126$.

According to the hypothesis of S. Eberhart and W. Russell, the higher regression coefficient, the greater response of the variety to change in environmental conditions. In other words, it has higher plasticity and responds positively on improving of environmental conditions. And vice versa, the lower regression coefficient, the lower plasticity of the variety and it less changes its productivity depending on change in environmental conditions. In our case, the ranking has shown that the highest rank (1) was in the Vernirubens variety, it had the highest plasticity. The average ranks were for the varieties Regenerata, Marilandica and E.s.-38 (2–4, respectively), and the lowest (5) – for the Pioneer variety. That is, in this case, the Pioneer variety, whose growth was less than other poplars (most likely this is due to its lower rooting and survival), has shown the lowest plasticity. Thus, its productivity, depending on improvement or degradation of environmental conditions in comparison with other poplars, changed less.

Hereafter, the theoretical average increments (\widehat{X}_{ij}) were calculated using equation 5:

$$\widehat{X}_{ij} = \overline{X}_i + r_i I_j. \quad (5)$$

They are presented in the table 3.

Table 3

Theoretical average increments of poplars in different environmental conditions (m³/ha/year)

Poplar varieties	Testing sites			Sum	Average increment
	Semiluky populetum, Voronezh region	Kumylga, Volgograd region	Ksenevka, Donetsk region		
Vernirubens	27.0	18.9	39.0	84.9	28.3
Marilandica	24.6	18.3	33.9	76.8	25.6
Regenerata-79	31.8	25.4	41.2	98.5	32.8
Pioneer	19.1	18.6	20.0	57.7	19.2
E.s.-38	25.0	18.8	34.2	78.0	26.0

As can be seen from the table 3 data and the actual average increments of the studied poplar varieties in table 2, the average values of the theoretical and actual increments on all testing sites are the same. However, these values may be different for each specific testing site. The deviations of the theoretical and actual values of the poplars' average increments obtained in this experiment are presented in table 4.

Table 4

Deviations of the theoretical and actual values of average increments of poplars

Poplar varieties	Testing sites			Sum of squared deviations
	Semiluky populetum, Voronezh region	Kumylga, Volgograd region	Ksenevka, Donetsk region	
Vernirubens	-2.5	+1.5	+1.0	9.50
Marilandica	+0.4	-0.3	-0.2	0.26
Regenerata-79	+7.2	-4.3	-2.9	78.74
Pioneer	-2.7	+1.6	+1.2	10.98
E.s.-38	-2.2	+1.3	+0.9	7.34

In the general case, to get the value of ecological stability variance for each variety, the sum of squared deviations of the theoretical from the actual values is divided by the number of degrees of freedom (equation 6):

$$S_i^2 = \frac{\sum_j d_{ij}^2}{n-2}, \quad (6)$$

where S_i^2 – variance of ecological stability for each variety.

In our case, since the number of testing sites is 3, the stability variance is equal to the sum of squared deviations given in table. 4.

As can be seen from the table 4 data, the Marilandica variety is distinguished by the highest stability of the average trunk wood increments in all of the studied testing sites. The average stability of the average trunk wood increments can be attributed to the following poplar varieties: E.s.-38, Vernirubens and Pioneer. The most productive poplar variety Regenerata in all environmental conditions of the studied testing sites showed the lowest variance of ecological stability.

Conclusion

The conducted research of a group of promising poplars on three testing sites of the forest-steppe and steppe zone of our country allowed to establish not only their phenotypic characteristics on survival, growth and productivity, but also their ecological plasticity and stability.

It was found that the most productive of the studied varieties was Regenerata. It was characterized by the average plasticity, but the lowest stability. So, it can perform high productivity only in the favorable environment for growth.

Poplar Pioneer, despite the fact that it was inferior in productivity to other varieties, was the most plastic with average ecological stability. Its productivity did not change too much with change in environmental conditions.

The Vernirubens variety has shown the minimum ecological plasticity with medium ecological stability.

Average indices of plasticity and stability are noted in the poplar variety E.s.-38, which allows it to be used in various environmental conditions.

Poplar Marilandica has demonstrated average plasticity and high stability.

In general, the studies have shown that poplar variety testing in different environment conditions allows obtaining a more complete characteristic of them, taking into account ecological plasticity and stability. This makes it possible to determine more appropriate ways for their using in afforestation and other applications in forest management.

REFERENCES

1. Альбенский А.В. Селекция древесных пород и семеноводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1959. 306 с. [Al'benskiy A.V. *Tree Breeding and Seed Production*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1959. 306 p.]
2. Бессчетнов П.П. Тополь (культура и селекция). Алма-Ата: Изд-во Наука, 1981. 152 с. [Besschetnov P.P. *Poplar (Planting and Breeding)*. Alma-Ata, Nauka Publ., 1981. 152 p.]
3. Богданов П.Л. Тополя и их культура. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 104 с. [Bogdanov P.L. *Poplars and Their Planting*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 104 p.]
4. Вересин М.М. Новый гибридный тополь для лесных культур и озеленения // Лесохоз. информ., 1974. № 6. С. 14–15. [Veresin M.M. A New Hybrid Poplar for Forest Plantations and Landscaping. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 1974, no. 6, pp. 14–15].
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 3-е изд. перер. и доп. М.: Колос, 1973. 336 с. [Dospikhov B.A. *Methods of Field Test (with the Basics of Statistical Processing of Research Results)*. Moscow, Kolos Publ., 1973. 336 p.]
6. Иванников С.П. Тополь. М.: Лесн. пром-сть. 1980. 85 с. [Ivannikov S.P. *Poplar*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 85 p.]
7. Коновалов Н.А. Селекция быстрорастущих древесных пород на Среднем Урале // Лесн. хоз-во, 1963. № 7. С. 55–58. [Konovalov N.A. Breeding of Fast-Growing Tree Species in the Middle Urals. *Lesnoye khozyaystvo*, 1963, no. 7, pp. 55–58].
8. Краснова Ю.С., Шаманин В.П., Петуховский С.Л., Кирилюк Л.М. Экологическая пластичность сортов мягкой яровой пшеницы в условиях южной лесостепи Западной Сибири // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16182> (дата обращения: 10.01.20). [Krasnova Yu.S., Shamanin V.P., Petukhovskiy S.L., Kirilyuk L.M. Ecological Plasticity of Grades of the Soft Springwheat in the Conditions of the Southern Forest-Steppe of Western Siberia. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6].
9. Наквасина Е.Н., Демина Н.А. Экологическая стабильность географических рас ели обыкновенной // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2014, № 2. С. 61–70. [Nakvasina E.N., Demina N.A. Ecological Stability of Geographical Races of Spruce. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"], 2014, no. 2, pp. 61–70].
10. Озолин Г.П. Селекция тополя в Узбекистане. Ташкент: РИО МСХ УзССР, 1962. 198 с. [Ozolin G.P. *Poplar Breeding in Uzbekistan*. Tashkent, RIO MSKh Uzbek SSR Publ., 1962. 198 p.]
11. Пакудин В.З. Оценка экологической пластичности сортов // Генетический анализ количественных и качественных признаков с помощью математико-статистических методов / науч. ред.: М.А. Федин, В.А. Драгавцев. М.: ВНИИТЭИ-сельхоз, 1973. С. 40–44. [Pakudin V.Z. Estimation of Ecological Plasticity of Varieties. *Genetic Analysis of Quantitative and Qualitative Characteristics Using Mathematical and Statistical Methods*. Moscow, VNIITEIsel'khoz Publ., 1973, pp. 40–44].

12. Потанин В.Г., Алейников А.Ф., Степочкин П.И. Новый подход к оценке экологической пластичности сортов растений // Вавилов. журн. генетики и селекции. 2014. Т. 18, № 3. С. 548–552. [Potanin V.G., Aleinikov A.F., Stepochkin P.I. A New Approach to Estimation of the Ecological Plasticity of Plant Varieties. *Vavilovskij zurnal genetiki i selekcii* [Vavilov Journal of Genetics and Breeding], 2014, vol. 18, no. 3, pp. 548–552].
13. Ростовцев С.А. Районирование культуры сортов тополей в европейской части РСФСР. М.: ВДНХ СССР, 1963. 6 с. [Rostovtsev S.A. *Zoning of Poplar Culture in the European Part of the USSR*. Moscow, VDNKh SSSR Publ., 1963. 6 p.].
14. Снедекор Дж.У. Статистические методы в применении к исследованиям в сельском хозяйстве и биологии. М.: Сельхозгиздат, 1961. 503 с. [Snedecor G.W. *Statistical Methods Applied to Experiments in Agriculture and Biology*. Moscow, Sel'khozizdat Publ., 1961. 503 p.].
15. Старова Н.В. Селекция ивовых. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 208 с. [Starova N.V. *Breeding of Salicaceae Family*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 208 p.].
16. Ториков В.Е., Богомаз О.А. Экологическая пластичность новых сортов картофеля // Вестн. Брян. гос. с.-х. акад. 2008. № 4. С. 60–63. [Torikov V.E., Bogomaz O.A. Ecological Plasticity and Stability by New Kinds of Potato. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2008, no. 4, pp. 60–63].
17. Тюрин А.В. Таксация леса. 2-е изд. М.: Гослестехиздат, 1945. 376 с. [Tyurin A.V. *Forest Inventory*. Moscow, Gosl'estekhizdat Publ., 1945. 376 p.].
18. Федин М.А., Силис Д.Я. Определение взаимодействия генотип–среда // Генетический анализ количественных и качественных признаков с помощью математико-статистических методов / науч. ред.: М.А. Федин, В.А. Драгавцев. М.: ВНИИТЭИ-сельхоз, 1973. С. 58–62. [Fedin M.A., Silis D.Ya. Determining the Interaction Genotype-Environment. *Genetic Analysis of Quantitative and Qualitative Characteristics Using Mathematical and Statistical Methods*. Ed. by M.A. Fedin, V.A. Dragavtsev. Moscow, VNIITSEI sel'khoz Publ., 1973, pp. 58–62].
19. Царев А.П. Сортоведение тополя. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1985. 152 с. [Tsarev A.P. *Research of Poplar Varieties*. Voronezh, VGU Publ., 1985. 152 p.].
20. Царев А.П. Рекомендации по выращиванию насаждений тополя в юго-восточной части европейской территории РСФСР. Воронеж: Изд-во ЦНИИЛГиС (ВНПО «Союзлесселекция»), 1986. 37 с. [Tsarev A.P. *Recommendations for Growing Poplar Plantations in the South-Eastern Part of the European Territory of the RSFSR*. Voronezh, TsNIILGiS Publ., 1986. 37 p.].
21. Царев А.П. Программы лесной селекции в России и за рубежом: моногр. М.: МГУЛ, 2013. 164 с. [Tsarev A.P. *Programs of Forest Tree Breeding in Russia and Abroad*: Monograph. Moscow, MGUL Publ., 2013. 164 p.].
22. Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Селекция лесных и декоративных древесных растений / под общ. ред. А.П. Царева. М.: МГУЛ, 2014. 552 с. [Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Breeding of Forest and Decorative Woody Plants*. Ed. by A.P. Tsarev. Moscow, MGUL Publ., 2014. 552 p.].
23. Царев А.П., Царева Р.П., Сапах А.Н. Отбор форм тополя для степной зоны европейской части СССР // Селекция ценных форм древесных пород и их использование для создания целевых насаждений. Воронеж: ЦНИИЛГиС, 1989. С. 71–78. [Tsarev A.P., Tsareva R.P., Sapakh A.N. Selection of Poplar Forms for the Steppe Zone of the European Part of the USSR. *Selection of Valuable Forms of Tree Species and Their Use for Creating Target Plantations*. Voronezh, TsNIILGiS Publ., 1989, pp. 71–78].
24. Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А. Динамика сохранности и продуктивности настоящих тополей при испытании в условиях умеренного климата // Информ. вестн. ВОГиС. Т. 14, № 2. 2010. С. 255–264. [Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A. The Time Pattern of Survival and Productivity of *Eurpopulus* Tested in the Temperate Climatic Belt. *Informatsionnyy vestnik VOGiS* [VOGiS Herald], 2010, vol. 14, no. 2, pp. 255–264].
25. Царева Р.П., Царев В.А. Результаты многолетних испытаний различных форм и гибридов тополей в Волгоградской области // Тр. Кубан. гос. аграр. ун-та.

2018. Вып. 4(73). С. 244–248. [Tsareva R.P., Tsarev V.A. The Long-Term Testing Results of Various Poplars' Forms and Hybrids in Volgograd Region. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Kuban State Agrarian University], 2018, iss. 73, pp. 244–248]. DOI: [10.21515/1999-1703-73-244-248](https://doi.org/10.21515/1999-1703-73-244-248)

26. Яблоков А.С. Пирамидальные тополи. М.: Л.: Гослесбумиздат, 1956. 58 с. [Yablokov A.S. *Pyramidal Poplars*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1956. 58 p.]

27. Carle J. Trends and Perspectives in Poplar and Willow Cultivation – A Global Synthesis of National Progress. *Abstracts of Submitted Papers and Posters of the International Poplar Commission: Poplars and Other Fast-Growing Trees – Renewable Resources for Future Green Economies*. Rome, FAO, 2016, p. 1.

28. Cochran W.G., Cox G.M. *Experimental Designs*. New York, John Wiley & Sons, 1957. 618 p.

29. Eberhart S.A., Russel W.A. Stability Parameters for Comparing Varieties. *Crop Science*, 1966, vol. 6, iss. 1, pp. 36–40. DOI: [10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x](https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x)

30. *First International Conference on the Future of Poplar Culture*. Rome, November 13–15, 2003. Rome, FAO Headquarters – Reports and Round Tables, 2003. 114 p.

31. Günther H. *Leitfaden für den Pappelanbau*. Berlin, Deutscher Bauernverlag, 1956. 199 S.

32. Hadži-Georgiev K. Goguševski M. Dvolazne tabele mass za topola klona *Populus euramericana* cv. I-214 u geveliskom području. *Topola*, 1972, T. XVI, no. 90, pp. 25–29.

33. Hofmann M. *Pappeln als nachwachsender Rohstoff auf Ackerstandorten – Kulturverfahren, Ökologie und Wachstum unter dem Aspekt der Sortenwahl*. Dissertation. Münden, Universität Göttingen, Schriften des Forschungsinstitutes für schnellwachsende Baumarten Hann, 2005, Bd. 8, 145 S.

34. Hofmann M., Janßen A. Genetic Improvement of Poplar and Prospects for Poplar Cultivation in Germany. *Abstracts of Submitted Papers and Posters of the International Poplar Commission: Poplars and Other Fast-Growing Trees – Renewable Resources for Future Green Economies*. Rome, FAO, 2016, p. 39.

35. Houtzagers G. *Het Geslacht Populus Verband met zijn Beteekenis voor de Houtteelt* [The Genus *Populus* and Its Significance in Silviculture]. Vageningen, H. Veenman & Zonen, 1937. 266 S.

36. Houtzagers G. *Die Gattung Populus und ihre forstliche Bedeutung*. Hannover, Verlag M. & H. Schaper, 1941. 196 S.

37. Lange O. Zum Stand der Pappelforschung in Westdeuthland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 1976, Bd. 31, S. 430–431.

38. Ostry M., Ramstedt M., Newcombe G., Steenackers M. Diseases of Poplars and Willows. *Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment*. Ed. by J.G. Isebrands, J. Richardson. Rome, FAO, 2014, pp. 443–458.

39. *Poplars and Willows in Wood Production and Land Use*. Rome, FAO, 1979. 328 p.

40. *Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment*. Ed. by J.S. Isebrands, J. Richardson. Rome, FAO, 2014. 634 p.

41. *Poplars in Forestry and Land Use*. Rome, FAO, 1958. 511 p.

42. Stout A.B., Schreiner E.J. Results of a Project in Hybridizing Poplars. *Journal of Heredity*, 1933, vol. 24, iss. 6, pp. 217–229. DOI: [10.1093/oxfordjournals.jhered.a103780](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a103780)

43. Tai G.C.C., Young D.A. Genotypic Stability Analysis of Eight Potato Varieties Tested in Series of Ten Trials. *American Potato Journal*, 1972, vol. 49, iss. 4, pp. 138–150. DOI: [10.1007/BF02861594](https://doi.org/10.1007/BF02861594)

44. Wricke G. Die Erfassung der Wechselwirkung zwischen Genotyp und Umwelt bei quantitative Eigenschaften. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, 1965, Bd. 53, S. 267–343.

45. Zsuffa L., Giordano E., Pryor L.D., Stettler R.F. Trends in Poplar Culture: Some Global and Regional Perspectives. *Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation*. Ed. by R.F. Stettler, Jr. H.D. Bradshaw, P.E. Heilman, T.M. Yinckley. Ottawa, NRC Research Press, 1996, pp. 515–539.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ НЕКОТОРЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СОРТОВ ТОПОЛЕЙ

А.П. Царев¹, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

В.А. Царев¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

Р.П. Царева¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

Н.В. Лаур², д-р с.-х. наук, доц.; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-1989-0384>

¹Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: antsa-55@yandex.ru, vad.tsareff@yandex.ru, tsarais42@mail.ru

²Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: laur@petrsu.ru

При разработке перспективных ассортиментов лесных древесных растений важно учитывать не только их рост и сохранность в каких-то одних условиях местопроизрастания, но и реакцию на изменение условий местопроизрастания. Цель исследования – анализ экологической пластичности и стабильности некоторых перспективных сортов тополей для юго-восточной части европейской территории России и Украины методом С. Эберхарта и В. Рассела. Исследования проводились в нагорных условиях лесостепной зоны Воронежской области и в пойменных условиях степной зоны Волгоградской и Донецкой областей. На каждом из экспериментальных объектов выделено и изучено по 5 перспективных сортов тополей. По каждому сорту приведены показатели его сохранности, роста в высоту и диаметра, объема стволов и продуктивности по запасам и средним приростам. Ввиду того, что средние приросты меняются с возрастом, выбран отрезок онтогенеза с 21 года до 30 лет, в течение которого средний прирост тополей изменяется незначительно. Установлено, что самым продуктивным из исследованных сортов является тополь сорта «Регенерата», отличающийся средней пластичностью, но самой низкой стабильностью. Он показывает высокую продуктивность только в благоприятных для роста условиях. Тополь «Пионер» наименее пластичен. Его продуктивность не очень сильно варьирует с изменением условий роста при средней экологической стабильности. Наибольшая пластичность при средней экологической стабильности была отмечена у сорта «Вернирубенс». Средние показатели пластичности и стабильности наблюдались у тополя сорта «Эс-38». Тополь «Мариландика» также отличается средней пластичностью, но высокой экологической стабильностью. Полученные результаты исследований позволяют более рационально использовать изученные сорта в различных условиях местопроизрастания с учетом их экологических характеристик.

Для цитирования: Tsarev A.P., Tsarev V.A., Tsareva R.P., Laur N.V. Evaluation of Ecological Plasticity and Stability of Some Promising Varieties of Poplars // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 119–130. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-119-130

Ключевые слова: сорта тополей, сохранность, рост, продуктивность, экологическая пластичность, экологическая стабильность, метод Эберхарта и Рассела.

Поступила 17.02.20 / Received on February 17, 2020



УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-131-144

ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ЛЕСНОЙ ПОЧВОГРУНТ В СЛОЖНЫХ СЕЗОННО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

С.Е. Рудов¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

В.Я. Шапиро², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

О.А. Куницкая³, 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. Григорьева², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

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

¹Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva_o@list.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Традиционно в Российской Федерации лесозаготовительные работы в основном проводятся в зимний период. Это связано с преобладанием в лесном фонде площадей с заболоченными и переувлажненными почвогрунтами (III и IV категории), работа техники на которых в теплый период года затруднена, а иногда и невозможна. Работа лесозаготовительных предприятий в лесах криолитозоны, характеризующихся резко континентальным климатом, с сильными морозами в зимний период, осложнена тем, что при температуре ниже -40°C лесные машины не рекомендуется эксплуатировать из-за высокой вероятности поломок металлоконструкций и гидравлической системы. При этом в теплый период года большая часть лесосек на мерзлотных почвогрунтах становится трудно проходимой для тяжелых лесных машин. Получается, что удобный период для проведения лесозаготовительных работ в лесах криолитозоны достаточно небольшой. Это часто приводит к необходимости работы в так называемый период межсезонья, когда температура воздуха становится положительной и начинаются процессы оттаивания верхнего слоя почвогрунтов. Это же касается и лесозаготовительных предприятий, не работающих в условиях мерзлотных почвогрунтов, например в Ленинградской, Новгородской, Псковской, Вологодской областях и др. Наблюдаемое потепление климата вызывает существенное сокращение периода устойчивой зимней заготовки. Частые переходы температуры через 0°C в зимний, осенний и весенний периоды приводят к необходимости также работать в период межсезонья, во время оттаивания почвогрунтов лесосек. В сложных сезонно-климатических условиях, к которым в первую очередь следует отнести межсезонные периоды в целом и наличие вечной мерзлоты в частности, учесть в математических моделях особенности процессов промерзания и оттаивания грунта и их влияние на характер процесса раз-

рушения весьма затруднительно. В статье показано, что при разработке долгосрочных прогнозных моделей показателей циклического взаимодействия трелевочной системы с лесным почвогрунтом в сложных климатических условиях проведения межсезонных лесозаготовительных работ с целью повышения их надежности необходима оперативная корректировка расчетных параметров на базе учета фактических опытных данных на заданном шаге циклов.

Для цитирования: Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Прогнозная модель воздействия трелевочной системы на лесной почвогрунт в сложных сезонно-климатических условиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 131–144. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-131-144

Ключевые слова: мерзлый почвогрунт, оттаивающий почвогрунт, лесозаготовка, трелевочная система, уплотнение почвогрунта, деформация почвогрунта.

Введение

Одним из основных качественных показателей взаимодействия трелевочной системы с массивом лесного почвогрунта является глубина колеи h , для прогноза и определения которой используют различные подходы и математические модели [11–13].

Почвогрунт, как сложный природный анизотропный объект, трудно описывается в рамках моделей сплошной среды (упругой, упруго-пластической, вязкой или иной). В сложных сезонно-климатических условиях, к которым в первую очередь следует отнести межсезонные периоды в целом и наличие вечной мерзлоты в частности, учесть в математических моделях особенности процессов промерзания и оттаивания грунта и их влияние на характер процесса разрушения весьма затруднительно [14, 16–20].

Цель исследования заключается в разработке прогнозной математической модели повышенной надежности для расчета показателей циклического взаимодействия трелевочной системы с лесным почвогрунтом в сложных климатических условиях проведения межсезонных лесозаготовительных работ.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются мерзлотные почвогрунты лесов криолитозоны. Используются справочные данные о физико-механических свойствах мерзлотных грунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Применялись методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах. Попытка разработать прогнозную модель образования колеи в процессе N -кратного прохода трелевочной системы, основанную только на фактических данных показателя h при $N = 0$ ($h = h_0$), $N = 1$ ($h = h_1$) и $N = 2$ ($h = h_2$), предпринята в [9, 15]. Параметр N выступает в качестве времени.

Модель предполагает решение дифференциального логистического уравнения первого порядка Ферхюльста:

$$\frac{dh}{dN} = \frac{rh}{H} (H - h), \quad (1)$$

где r – постоянный коэффициент пропорциональности, подлежащий определению из начальных условий; H – максимальная глубина колеи.

В процессе решения уравнения (1) найдена константа r в виде

$$r = \ln \left[\frac{h_2(h_0 - h_1)}{h_0(h_1 - h_2)} \right], \quad (2)$$

при этом неопределенная константа интегрирования C принимается равной $C = \frac{h_0}{H}$.

Установлено, что график найденной функции $h(N)$ содержит асимптотический участок, абсцисса точки начала которого зависит от значения h_0 – исходной глубины колеи до первого цикла прохода.

На рис. 1 представлена типичная расчетная кривая $h(N)$, полученная в [8] при следующих опытных данных: $h_0 = 4$ см, $h_1 = 4,29$ см и $h_2 = 4,6$ см. При этом найдены константы $r = 0,0757$ и $C = 0,07207$. Для таких h_0 и C определен параметр максимальной глубины $H = 55,5$ см, и эта величина сохраняет постоянное значение при любом N вплоть до $N = 100$.

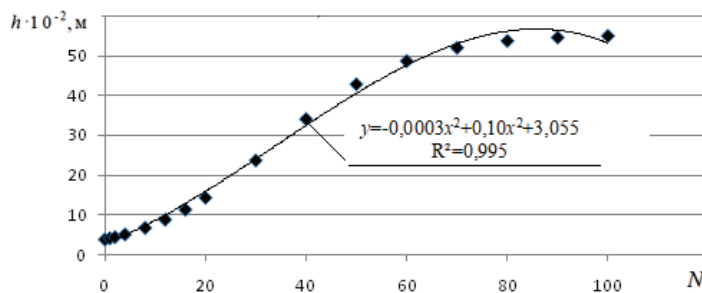


Рис. 1. Зависимость глубины колеи от количества проходов

Fig. 1. Dependence of the track depth (h) on the number of passes (N)

Анализ прогнозных показателей величины h по мере роста числа проходов трелевочной системы показывает, что, во-первых, от начальных значений и вплоть до $N = 30$ происходит резкое увеличение приращения глубины колеи (рис. 2).

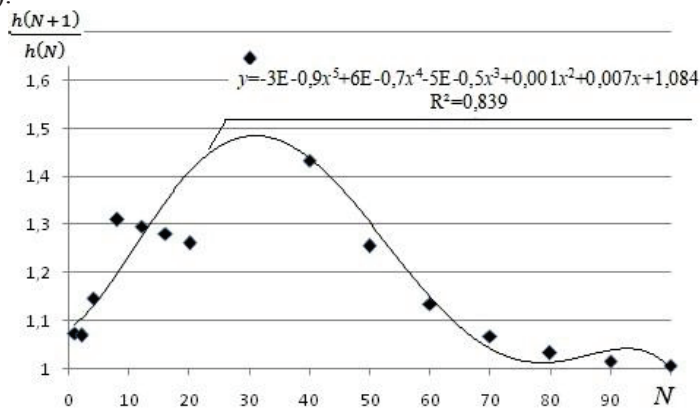


Рис. 2. Изменение отношения $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ с ростом числа проходов

Fig. 2. Change in the ratio $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ as the number of passes increases

После этого момента времени наблюдаются аналогичный резкий спад приращений до достижения $N = 80$ и последующее плавное снижение прироста глубины колеи. Во-вторых, можно предположить, что подобный долгосрочный прогноз глубины колеи по трем фактическим данным h при $N = 0, 1, 2$ в узком диапазоне изменения h от 4 до 4,6 см без корректировки результатов расчетов приведет к существенному расхождению с фактическими показателями h даже при относительно небольших $N > 10$.

Еще одним аргументом в пользу необходимости корректировки расчетных данных является принятое условие $H = \text{const}$ на всем периоде изменения числа проходов N от 0 до 100, т. е. на достаточно большом отрезке времени.

Дело в том, отмечается в [5] на базе исследований [4], что в межсезонные периоды лесозаготовок, особенно на оттаивающих почвогрунтах, по мере увеличения глубины колеи и числа проходов трелевочной системы возрастает влажность грунта при приближении к водонепроницаемой границе с зоной мерзлоты. Глубину расположения указанной границы можно принять за глубину расположения твердого основания, т. е. за максимально возможную глубину колеи H .

Таким образом, с ростом N и параметр H имеет тенденцию к росту, при этом в силу увеличения влажности W несущая способность грунта (величина сцепления и угол внутреннего трения) существенно снижается [4], что неизбежно обусловит соответствующее уменьшение модуля общей деформации E .

В дополнение к сказанному в межсезонные периоды при больших температурных градиентах свойства почвогрунта во времени (а параметр N в предложенной модели является временным аргументом) существенно меняются. Из этого следует, что при значительных (более 10) изменениях параметра N трелевочная система будет взаимодействовать с объектом, обладающим иными по сравнению с исходными свойствами.

Математическая модель, разработанная в [5] на принципах формирования матриц переходных состояний Маркова [8, 10], показывает, что учет фактора влияния температуры окружающей среды на процессы перехода воды в лед и обратно приводит к росту вариативности исходных параметров, что снижает надежность прогноза конечных показателей глубины колеи.

Наряду с этим показатель влажности массивов сплошных сред различной природы под внешним статическим давлением также характеризуется большим разбросом [1, 2], что позволяет сделать вывод о зависимости состояния почвогрунта от количества циклов взаимодействия с ним трелевочной системы. Отмеченные особенности интегрально могут быть учтены только путем корректировки прогнозных данных в процессе опытной реализации расчетной модели.

Тем не менее подход [9] обладает очевидным преимуществом, вытекающим из отсутствия необходимости установления сведений о физико-механических свойствах лесного почвогрунта, особенно в сложных климатических условиях межсезонных периодов проведения лесозаготовительных работ. В связи с этим возникает потребность разработки такой прогнозной модели, которая основывалась бы также на опытных данных, но была открытой для ввода фактических показателей h при относительно небольшом шаге N (не более 5), т. е. обладала бы свойством оперативности.

Иными словами, если на каком-то этапе фактические значения глубины колеи h_{ϕ} отличаются от расчетных значений h в большую сторону на заданную погрешность, модель обязана учесть это расхождение и внести соответствующие коррективы.

Следуя принципам формирования логистического уравнения [8], будем считать, что скорость $\frac{dh}{dN}$ процесса образования колеи пропорциональна величине $H - h$, что приводит к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dh}{dN} = k(H - h), \quad (3)$$

общее решение которого принимает вид

$$h = H - C_1 e^{-kN}. \quad (4)$$

Две неизвестные константы C_1 и k находим из начальных условий:

а) при одном опытном измерении в процессе первого прохода имеем:

$$\text{при } N = 0 \rightarrow h = 0; \text{ при } N = 1 \rightarrow h = h_1; \quad (5)$$

б) при двух опытных измерениях:

$$\text{при } N = 1 \rightarrow h = h_1; \text{ при } N = 2 \rightarrow h = h_2. \quad (6)$$

Частные решения при условиях (5) и (6) принимают соответственно вид

$$h = H - \frac{(H-h_1)^N}{H^{N-1}}; \quad (7a)$$

$$h = H - \frac{(H-h_2)^{N-1}}{(H-h_1)^{N-1}}. \quad (7b)$$

Возьмем за основу решение (7a) и пусть произведено одно измерение глубины колеи $h_1 = 0,02$ м после первого прохода трелевочной системы при опытном значении параметра максимальной глубины колеи до начала работ $H_0 = 0,3$ м.

На рис. 3, а представлен график зависимости $h(N)$, а на рис. 3, б (по аналогии с рис. 2) – изменение отношения $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ с ростом N .

Анализ рис. 3, а позволяет сделать вывод об адекватном характере поведения кривой $h(N)$, а в соответствии с рис. 3, б уже при небольшом числе проходов, начиная практически с $N = 4-5$, наблюдается асимптотическое изменение прироста глубины колеи, что подтверждается и данными практики.

С целью более оперативного контроля за фактическими данными примем в качестве шага изменения числа проходов значение $N = 4$ и допустим, что на этом шаге фактическое $h_{\phi}(4) = 0,073$ отличается от расчетного $h(4) = 0,072$ м более чем на 1 %. Данное отличие примем за минимально допустимую погрешность Δh_{\min} определения параметра h .

Увеличение фактического значения h_{ϕ} по сравнению с расчетным h при постоянстве веса пачки трелюемых лесоматериалов P , давления в шинах q и скорости движения форвардера v можно трактовать как обусловленное ростом параметра H в связи со снижением несущей способности почвогрунта.

Для определения фактического $H_{\phi}(4)$, соответствующего измеренному значению $h_{\phi}(4)$, требуется решить трансцендентное уравнение:

$$h_{\phi}(4) - H_{\phi}(4) + \frac{(H_{\phi}(4) - h_1)^N}{H_{\phi}(4)^{N-1}} = 0. \quad (8)$$

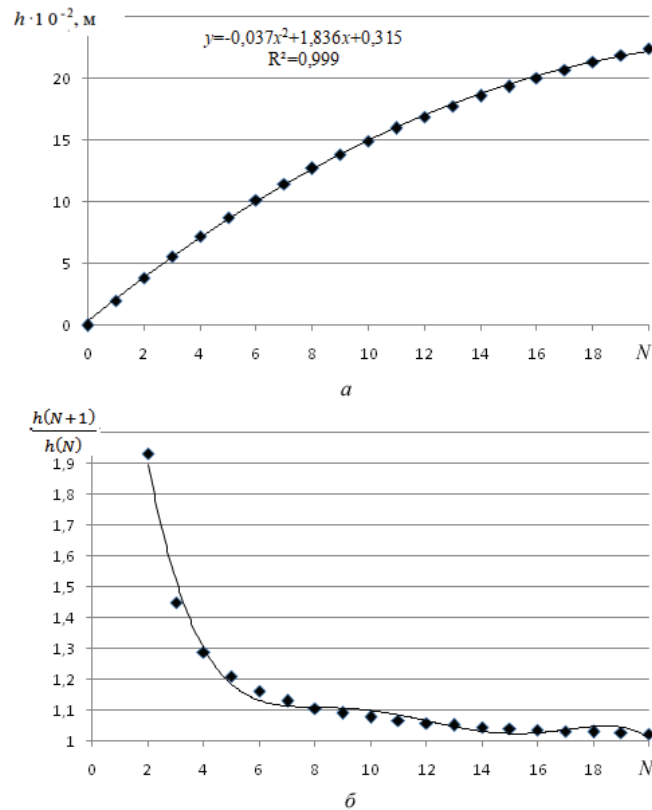


Рис. 3. Зависимости глубины колеи (a) и отношения $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ (b) от числа проходов

Fig. 3. Dependencies of the track depth (a) and the ratio $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ (b) on the number of passes

Уточненное значение $H_{\phi}(4)$ необходимо учесть в соотношении (7а) для расчетов глубины колеи h на следующем шаге циклов, т.е. при изменении числа проходов в диапазоне $N = 5-8$.

Решение (8) численным способом дало возможность установить значение $H_{\phi} = 0,32$ м, что на 6,7 % превышает исходное значение $H_0 = 0,3$ м.

Уместно отметить, что между модулем общей деформации E и глубиной H существует устойчивая корреляционная связь: $H = 0,4714E^{-0,479}$, что позволяет сделать вывод о снижении модуля деформации от начального уровня $E_0 = 1290$ до $E = 1205$ кПа, т. е. более чем на 7 %. Этот результат обуславливает соответствующее увеличение общей деформации ϵ_0 почвогрунта в процессе воздействия на него трелевочной системы.

При $N = 8$ производят сравнение расчетных и фактических значений глубины колеи и при превышении h_{ϕ} над h более чем на допустимую погрешность Δh_{\min} повторяют алгоритм корректировки параметров h , H и E при выполнении расчетов на этапе $N = 9-12$ и т. д.

Расчетные и фактические значения указанных параметров в моменты корректировок приведены в таблице. Значения h_p соответствуют расчету по формуле (7а) без корректировки глубины колеи.

Параметры процесса образования колеи

N	h_p	h	h_ϕ	Δh , %	H	H_ϕ	ΔH , %	E	E_ϕ
	$\cdot 10^{-2}$, м				$\cdot 10^{-2}$, м				
4	7,2	7,2	7,3	1,4	30,0	32,0	6,7	1290	1205
8	12,7	12,9	13,3	4,7	32,0	37,3	16,5	1205	1119
12	16,9	18,1	18,5	9,5	37,3	41,0	9,9	1119	1070
16	20,1	22,5	23,0	14,4	41,0	43,4	5,9	1070	1041
20	22,4	26,5	27,0	20,5	43,4	45,6	5,0	1041	1017

На рис. 4, а представлены зависимости h_p и h_ϕ (кривые 1 и 2 соответственно) от числа проходов N , которые с высокой точностью описываются параболическими уравнениями, а на рис. 4, б – абсолютная погрешность Δh по мере роста N .

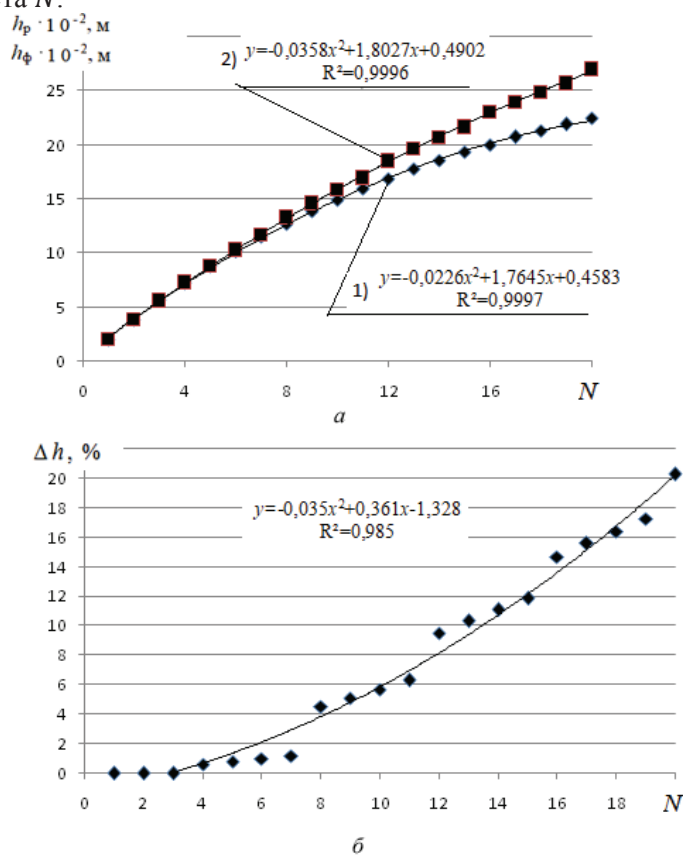


Рис. 4. Зависимости глубины колеи (а, 1 – h_p ; 2 – h_ϕ) и погрешности расчетов глубины колеи (б) от числа проходов

Fig. 4. Dependencies of the track depth (а, 1 – predicted track depth (h_p); 2 – actual track depth (h_ϕ)) and the track depth calculation error (Δh) on the number of passes

Данные рис. 4 свидетельствуют о том, что после второй корректировки значений глубины колеи ($N \geq 8$) учет погрешности расчетов с помощью ввода в прогнозную модель опытных фактических данных является оправданным, поскольку значения Δh четырехкратно превышают допустимое значение

Δh_{\min} . При достижении числом проходов $N = 12$ погрешность расчетов приближается к 10 %, а затем превышает это значение, при $N = 20$ погрешность составляет 20 % и более. Учитывать такие расхождения представляется необходимым.

Интерес вызывает анализ параболических кривых на рис. 4, а и 4, б. Если с определенными оговорками можно говорить о проявлении асимптотического характера кривой $h_p(N)$, начиная с некоторого $N > 16$, то для кривой $h_\phi(N)$ и тем более кривой погрешностей $\Delta h(N)$ на рис. 4, б сделать такие выводы не представляется возможным. Более того, при $N > 16$ имеет место существенный рост параметра Δh , что позволяет заключить, что прогнозные долгосрочные модели при больших N (более 16) нельзя считать эффективными без механизма корректировок, хотя абсолютный прирост глубины колеи имеет тенденцию к снижению, в связи с чем растет и надежность расчетов.

В [5], на основе вариационного метода определения параметров взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим грунтом, разработана шкала несущей способности массива по критерию глубины колеи h .

Установлено, что величина h при постоянстве параметров влажности и коэффициента Пуассона пропорциональна давлению в шинах q :

$$h \sim a \sqrt{\frac{q}{2,2q+30,64}} \quad (9)$$

где a – радиус контактной площадки, зависящий от веса пачки P и, соответственно, q .

С помощью соотношения (9) представляется возможным оценить взаимосвязь между погрешностями определения глубины колеи и давления в шинах. Превышение параметра h на заданную погрешность Δh равносильно требованию снижения давления в шинах на Δq .

Современные системы управления форвардером позволяют при неблагоприятных условиях эксплуатации на слабых почвогрунтах и предельном погружении колес в почвогрунт снижать q до 20 %, в частности с 35 до 28–29 кПа [6, 7]. Проблема управления величиной q весьма актуальна в связи с необходимостью максимальной загрузки и повышения эффективности эксплуатации таких дорогостоящих лесных машин, как форвардеры [3].

Экологичные шины форвардеров, с низким давлением (до 10 кПа), могут быть особенно эффективными для участков почвогрунтов с низкой и чрезвычайно низкой несущей способностью V–VII категорий, где глубина колеи превышает 0,3 м.

Для обоснования взаимосвязи параметров Δh и Δq выполнены необходимые исследования, результаты которых представлены на рис. 5.

По данным рис. 5 снизить давление на 10 % представляется целесообразным, если погрешность Δh превысит расчетное значение h более чем на 4 %, т.е. когда имеет место четырехкратное превышение порогового значения $\Delta h_{\min} = 1$ %.

Если обратиться к рис. 4, б, то можно заключить, что число проходов N будет близко к значению 8, т.е. до второй корректировки величины h можно оперативно управлять процессом взаимодействия трелевочной системы с почвогрунтом лесосеки посредством контроля давления в шинах, допуская снижение до 10 %, в частности с 35 до 32 кПа. Максимально возможное уменьшение q на 20 % (с 35 до 29 кПа) позволяет оперативно корректировать глубину колеи в течение $N = 12$ циклов проходов трелевочной системы.

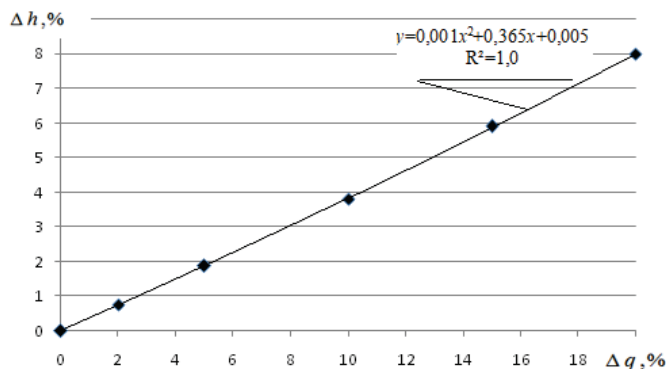


Рис. 5. Соотношение между погрешностями определения глубины колеи и давления в шинах

Fig. 5. The ratio between the track depth calculation error Δh and tire pressure calculation error (Δq)

Особо следует отметить снижение модуля деформации E_ϕ с ростом числа проходов, обусловленное увеличением значений параметра H_ϕ (поскольку с ним связаны процессы деформации почвогрунта). Результаты этих исследований отражают данные рис. 6, на котором представлены зависимости от числа проходов безразмерных величин: кривая 1 – отношения глубины H_ϕ к начальной глубине H_0 , кривая 2 – отношения уточненного модуля деформации E_ϕ к начальному E_0 .

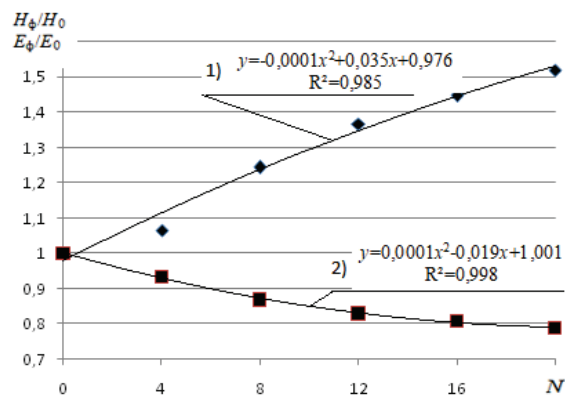


Рис. 6. Зависимости отношений максимальных глубин колеи (H_ϕ/H_0 , 1) и модулей общей деформации (E_ϕ/E_0 , 2) от числа проходов

Fig. 6. Dependences of the maximum track depths (H_ϕ/H_0 , 1) and deformation moduli (E_ϕ/E_0 , 2) on the number of passes; where index ϕ means actual, index 0 – initial

Как видно из характера поведения кривой 1 при долгосрочном прогнозе ($N > 16$), отклонение глубины от начального значения превышает 40 %, а модуля деформации – 20 %, что является дополнительным и весомым аргументом в пользу необходимости учета фактических данных в прогнозных моделях.

Принимая во внимание особую важность применения параметра E в различных математических моделях механики контактного разрушения сплошной среды, в частности моделях деформирования и разрушения оттаявшего грунта [5], на рис. 7 изображен график функции $E_\phi(N)$.

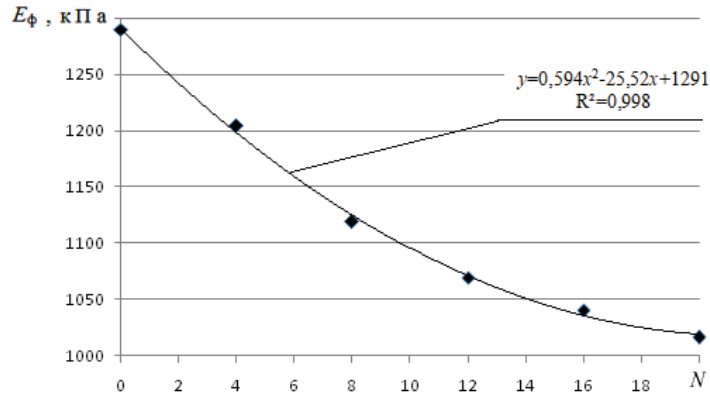


Рис. 7. Зависимость модуля общей деформации от числа проходов

Fig. 7. Dependence of the deformation modulus on the number of passes

Зависимости E_ϕ от N с достаточной точностью описываются затухающей параболой. При постоянстве давления в шинах это обусловит соответствующий рост показателя общей относительной деформации ε_0 почвогрунта.

Результаты исследований процесса образования колеи позволили получить данные (рис. 8) о характере изменения с ростом параметра N безразмерных величин: ξ_p – отношения расчетных значений $h_p(N+1)$ и $h_p(N)$ и ξ_ϕ – отношения скорректированных значений $h_\phi(N+1)$ и $h_\phi(N)$.

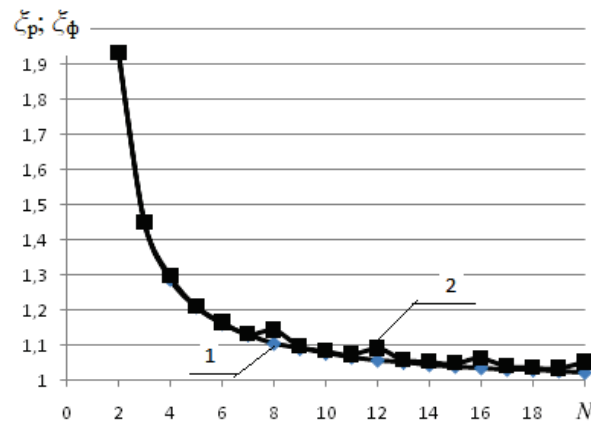


Рис. 8. Зависимость безразмерных величин ξ_p (1) и ξ_ϕ (2) от числа проходов

Fig. 8. Dependence of the predicted and actual dimensionless coefficients ξ_p (1) and ξ_ϕ (2) on the number of passes

Как видим, кривые 1 и 2 на рис. 8 фактически совпадают и имеют два четко выраженных участка: существенное снижение ξ до значений $N = 6-8$ и слабое асимптотическое снижение ξ при дальнейшем росте параметра N .

В заключительной части исследования уместно оценить влияние алгоритма корректировки прогнозных показателей по фактическим значениям глубины колеи на процесс деформации почвогрунта при наличии остаточной компоненты $\varepsilon_{п}$ в общей величине ε_0 (рис. 9).

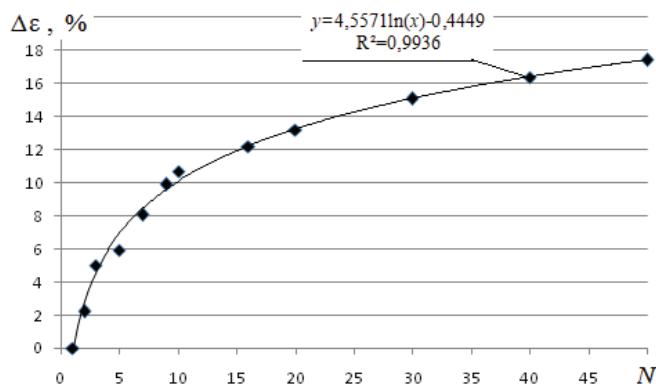


Рис. 9. Влияние числа проходов на погрешность определения общей деформации почвогрунта

Fig. 9. Influence of the number of passes on the deformation error of soil

Согласно рис. 9, с увеличением числа проходов N погрешность $\Delta\varepsilon$ при определении общей деформации с учетом и без учета фактических данных $h_{ф}$ практически не зависит от параметра $\varepsilon_{п}$, который изменялся в диапазоне от 0 до 50 % ε_0 . Как видно, при достижении параметра $N = 8-10$ погрешность $\Delta\varepsilon$ превышает 10 % и, несмотря на дальнейшее асимптотическое поведение возрастающей функции $\Delta\varepsilon(N)$, результаты свидетельствуют о правомерности предложенного подхода корректировки при реализации долгосрочных моделей установления глубины колеи и процессов деформации почвогрунта.

Заключение

Результаты выполненных исследований убедительно подтверждают вывод о том, что при разработке долгосрочных прогнозных моделей показателей циклического взаимодействия трелевочной системы с лесным почвогрунтом в сложных климатических условиях проведения межсезонных лесозаготовительных работ с целью повышения их надежности необходима оперативная корректировка расчетных параметров на базе учета фактических опытных данных на заданном шаге циклов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Катаров В.К., Сунёв В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 2012. Т. 9, № 2. С. 73–81. [Katarov V.K., Syunev V.S., Ratkova E.I., Gerasimov Y.Y. Impact of Wood Forwarding on Forest Soils. *Trudy lesoinzhenerenogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 2012, vol. 9, no. 2, pp. 73–81].

2. Ковалева Н.В., Катаров В.К., Ратькова Е.И. Исследование влияния циклов «замораживание – оттаивание» на характеристики лесных почво-грунтов, используемых при строительстве лесных дорог // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-3(8-3). С. 176–180. [Kovaleva N.V., Katarov V.K., Ratkova E.I. “Freezing and Defrosting” Effect on Characteristics of Forest Soils Used in Forest Road Construction. *Aktual’nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2014, vol. 2, no. 3-3(8-3), pp. 176–180]. DOI: [10.12737/4221](https://doi.org/10.12737/4221)
3. Прядкин В.И. Воздействие экологичной шины на почву // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2011. Т. 7, № 3. С. 198–200. [Pryadkin V.I. Influence of the Harmless Tire on Ground. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2011, vol. 7, no. 3, pp. 198–200].
4. Роман Л.Т., Царанов М.Н., Котов П.И., Волохов С.С., Мотенко Р.Г., Черкасов А.М., Штейн А.И., Костоусов А.И. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: КДУ, 2018. 188 с. [Roman L.T., Tsaranov M.N., Kotov P.I., Volokhov S.S., Motenko R.G., Cherkasov A.M., Shteyn A.I., Kostousov A.I. *A Guide for Determining the Physical and Mechanical Properties of Freezing, Frozen and Thawing Dispersed Soils*. Moscow, KDU Publ., 2018. 188 p.].
5. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 1. С. 52–61. [Rudov S.E., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Interaction Features of Skidding System with Thawing Soil. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 52–61]. DOI: [10.18698/2542-1468-2019-1-52-61](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-1-52-61)
6. Сюнёв В.С., Катаров В.К. Воздействие процессов лесозаготовок на лесную среду Северо-Западного региона РФ // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 2008. № 7. С. 120–121. [Syunev V.S., Katarov V.K. Wood Harvesting Processes Impact on the Forest Environment on the North-West of the Russian Federation. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 2008, no. 7, pp. 120–121].
7. Сюнёв В.С., Катаров В.К. Особенности формирования инфраструктуры лесосек // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 2010. № 8. С. 151–152. [Syunev V.S., Katarov V.K. Features of Forming the Infrastructure of Cutting Areas. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 2010, no. 8, pp. 151–152].
8. Сюнёв В.С., Коновалов А.П., Селиверстов А.А. Сравнение эффективности технологий лесозаготовок на основе экспертного анализа // Учен. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2008. № 3(94). С. 89–93. [Syunev V.S., Konovalev A.P., Seliverstov A.A. Comparison the Effectiveness of of Logging Technologies Based on Expert Analysis. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences], 2008, no. 3(94), pp. 89–93].
9. Сюнёв В.С., Ратькова Е.И. Методика прогнозирования воздействия лесозаготовительных машин на почвогрунты в межсезонные периоды // Учен. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2012. № 6(127). С. 70–74. [Syunev V.S., Rat'kova E.I. Methods Prognosticating Harvesters' Impact on Soil during Transitional Seasons. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences], 2012, no. 6, pp. 70–74].
10. Сюнёв В.С., Соколов А.П. Применение логистического подхода к решению задач управления лесозаготовительным производством // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2016. Т. 3, № 1. С. 447–452. [Syunev V., Sokolov A. Use of a Logistical Approach to the Wood Harvesting Planning Performance. *Al'ternativnyye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy ratsion-*

al'nogo ispol'zovaniya [Alternative Energy Sources in the Transport-Technological Complex: Problems and Prospects of Rational Use], 2016, vol. 3, no. 1, pp. 447–452]. DOI: [10.12737/17771](https://doi.org/10.12737/17771)

11. Finnegan J., Regan J.T., de Eyto E., Ryder E., Tiernan D. Healy M.G. Nutrient Dynamics in a Peatland Forest Riparian Buffer Zone and Implications for the Establishment of Planted Saplings. *Ecological Engineering*, 2012, vol. 47, pp. 155–164. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2012.06.023](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.023)

12. Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 35–45.

13. Grigorev M., Grigoreva A., Grigorev I., Kunickaya O., Stepanova D., Savvinova M., Sidorov M., Tomashevskaya E., Burtseva I., Zakharova O. Experimental Findings in Forest Soil Mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2018, vol. 12, iss. 2, pp. 277–287.

14. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-Friendly Logging in the Context of Water Logged Soil and Knob-and-Ridge Terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22–27. DOI: [10.26480/jmerd.02.2018.22.27](https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.22.27)

15. Kleibl M., Klvač R., Lombardini C., Porhaly J., Spinelli R. Soil Compaction and Recovery after Mechanized Final Felling of Italian Coastal Pine Plantations. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 63–71.

16. Manukovsky A.Y., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova Yu.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunitskaya O.A. Increasing the Logging Road Efficiency by Reducing the Intensity of Rutting: Mathematical Modeling. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 35–41. DOI: [10.26480/jmerd.02.2018.36.42](https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.36.42)

17. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunickaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific Features of Influence of Propulsion Plants of the Wheel-Tire Tractors upon the Cryomorphic Soils, Soils, and Soil Grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, iss. 1, pp. 2052–2071.

18. Valera D.L., Gil J., Agüera J. Design of a New Sensor for Determination of the Effects of Tractor Field Usage in Southern Spain: Soil Sinkage and Alterations in the Cone Index and Dry Bulk Density. *Sensors*, 2012, vol. 12, iss. 10, pp. 13480–13490. DOI: [10.3390/s121013480](https://doi.org/10.3390/s121013480)

19. Wästerlund I., Andersson E. Increased Harvesting Operation Using Adapted Ground Pressure to Soil Conditions. *17th International Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems*. Blacksburg, VA, ISTVS, 2011, pp. 521–527.

20. Zhuk A.Yu., Hahina A.M., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Manukovskii A.Yu., Kunickaya O.A., Danilenko O.K., Grigoreva O.I. Modelling of Indenter Pressed into Heterogeneous Soil. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, iss. 8 SI, pp. 6419–6430. DOI: [10.36478/jeasci.2018.6419.6430](https://doi.org/10.36478/jeasci.2018.6419.6430)

A PREDICTIVE MODEL OF THE IMPACT OF THE SKIDDING SYSTEM ON FOREST SOIL IN SEVERE CLIMATIC CONDITIONS

S.E. Rudov¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

V.Ya. Shapiro², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

I.V. Grigorev³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

O.A. Kunitskaya³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

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

O.I. Grigoreva², *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>*

¹Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru

²St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva_o@list.ru

³Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoeye, 3-y km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

In the Russian Federation logging operations are traditionally carried out in winter. This is due to the predominance of areas with swamped and water-logged (class III and IV) soils in the forest fund, where work of forestry equipment is difficult, and sometimes impossible in the warm season. The work of logging companies in the forests of the cryolithozone, characterized by a sharply continental climate, with severe frosts in winter, is hampered by the fact that forest machines are not recommended to operate at temperatures below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ due to the high probability of breaking of metal structures and hydraulic system. At the same time, in the warm season, most of the cutting areas on cryosolic soils become difficult to pass for heavy forest machines. It turns out that the convenient period for logging in the forests of the cryolithozone is quite small. This results in the need of work in the so-called off-season period, when the air temperature becomes positive, and the thawing processes of the soil top layer begin. The same applies to the logging companies not operating in the conditions of cryosolic soils, for instance, in the Leningrad, Novgorod, Pskov, Vologda regions, etc. The observed climate warming has led to a significant reduction in the sustained period of winter logging. Frequent temperature transitions around $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in winter, autumn and spring necessitate to work during the off-season too, while cutting areas thaw. In bad seasonal and climatic conditions, which primarily include off-season periods in general and permafrost in particular, it is very difficult to take into account in mathematical models features of soil freezing and thawing and their effect on the destruction nature. The article shows that the development of long-term predictive models of indicators of cyclic interaction between the skidding system and forest soil in adverse climatic conditions of off-season logging operations in order to improve their reliability requires rapid adjustment of the calculated parameters based on the actual experimental data at a given step of the cycles.

For citation: Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. A Predictive Model of the Impact of the Skidding System on Forest Soil in Severe Climatic Conditions. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 131–144. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-131-144

Keywords: frozen soil, thawing soil, logging, skidding system, soil compaction, soil deformation.

Поступила 03.07.19 / Received on July 3, 2019

УДК 630*375.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-145-154

ПОТРЕБЛЕНИЕ ТОПЛИВА ПОРТАЛЬНЫМ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ТРАКТОРОМ С УЧЕТОМ СТОХАСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Д.Г. Мясищев, д-р техн. наук, проф.

Д.Н. Шостенко, канд. техн. наук, доц.

А.В. Серебrenников, асп.; ResearcherID: [AAY-1917-2020](https://orcid.org/0000-0002-2935-860X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2935-860X>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: d.myasishchev@narfu.ru, d.shostenko@narfu.ru, serebrennikov.a@edu.narfu.ru

В современных условиях просматривается тенденция создания универсальной тракторной базы тягового класса. С позиции производителя таких тракторов, все очень целесообразно и логично: минимизируется количество унифицированных узлов и агрегатов, снижается номенклатурный список комплектующих. Однако это приемлемо до определенной степени, которая ограничена технологическим шлейфом для создаваемого трактора и спецификой его применения. В статье рассматриваются портальный лесохозяйственный трактор тягового класса 6 кН, имеющий разнообразный шлейф рабочих органов и машин, а также грузовую платформу на задней шарнирно-соединенной секции, и грузовой режим движения агрегата по случайному микропрофилю под колесами в колеях. Решается задача статистической динамики. В качестве выходного процесса строится изображение Лапласа для часового расхода топлива двигателем трактора, в качестве входного процесса моделируется Лапласово изображение внешнего случайного воздействия от микропрофиля по колеям. При этом определяется передаточная функция часового расхода топлива, которая позволяет при заданном микропрофиле по колеям оценить спектральную плотность часового расхода топлива трактором и дисперсию часового расхода. С использованием корреляционной теории случайных процессов оценивается математическое ожидание часового расхода топлива при транспортных работах и появляется возможность решения оптимизационной задачи – выбора таких шин ходовых тележек, при которых обеспечивается минимум дисперсии и математического ожидания часового расхода топлива транспортного агрегата. Ситуационная комбинация сводится к тому, что с ростом радиуса шин, с одной стороны, происходит увеличение высоты центра тяжести агрегата, что способствует повышению часового расхода топлива, но, с другой стороны, увеличение радиуса шины снижает коэффициент сопротивления качению колеса и расход топлива. Таким образом, имеется задача дискретной оптимизации – выбора конструкции шины, при которой минимизируются энергетические затраты исследуемого транспортного агрегата.

Для цитирования: Мясищев Д.Г., Шостенко Д.Н., Серебrenников А.В. Потребление топлива портальным лесохозяйственным трактором с учетом стохастических факторов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 145–154. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-145-154

Ключевые слова: портальный трактор, микропрофиль, расход топлива, передаточная функция, оптимизация.

Введение

В современном лесном хозяйстве широко применяются малогабаритные тракторы различных заводов-производителей. Они существенно отличаются

по целому ряду параметров и компоновочных решений. Многие лесохозяйственные предприятия оснащены необходимыми малогабаритными (мощность до 15 кВт, тяговый класс 6 кН и менее) тракторами и самоходными шасси.

Выделяется ряд малогабаритных тракторов и тракторных самоходных шасси, которые выступают в качестве лесохозяйственных. Например, из числа колесных тракторов в перечень лесохозяйственных можно включить трактор Владимирского тракторного завода ТЛ-28 (тяговый класс 6 кН, колесная формула 4×4) с шарнирно-сочлененной ходовой частью и его аналог – трактор ТЛ-30 (тяговый класс 9 кН, колесная формула 4×4), изготавливаемый на заводе им. В.А. Малышева. Оба трактора схожи по компоновке и используются для трелевки древесины от рубок ухода разного вида, а также в агрегате с различными лесохозяйственными машинами и орудиями. Важным достоинством этих машин является шарнирно-сочлененная конструкция рамы, что обеспечивает положительные эксплуатационные свойства – высокую проходимость и маневренность машинно-тракторного агрегата на шасси, оптимальное использование широкопрофильных шин низкого давления. Это имеет определяющее значение для экологической совместимости ходовой системы машин и лесных почв. К отрицательным качествам тракторов относится то, что они представляют из себя только тяговые машины и не имеют возможности перевозить грузы без прицепа или дополнительного оборудования, например канатно-чокерной системы или захвата для перемещения пачек.

Смежным с тракторами Т-28 и Т-30 по достоинствам и недостаткам является малогабаритный колесный трактор Т-25АЛ (тяговый класс 6 кН, колесная формула 4×4), который по сравнению с ними обладает важным преимуществом – имеет большой агротехнический просвет. Достоинство подобного конструктивного решения – возможность монтажа технологического оборудования под корпусами полурам трактора. Кроме того, его задняя секция может оборудоваться грузовым кузовом, возможно самосвальным. Потенциально это позволяет использовать компоненты рассматриваемых тракторов и их технологические шлейфы для выполнения специфических лесохозяйственных мероприятий по обработке кустарниковых культур в ландшафтном строительстве, при проведении работ в междурядьях лесных питомников, перевозке малогабаритных грузов.

Объекты и методы исследования

На кафедре транспортно-технологических машин, оборудования и логистики Северного (Арктического) федерального университета ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию малогабаритного лесохозяйственного порталного шарнирно-сочлененного трактора, а также технологического шлейфа для него [10, 12, 18]. Устройство и конструкция этого образца-концепта интерпретированы информационным содержанием и фотоиллюстрацией его транспортной комплектации (рис. 1).

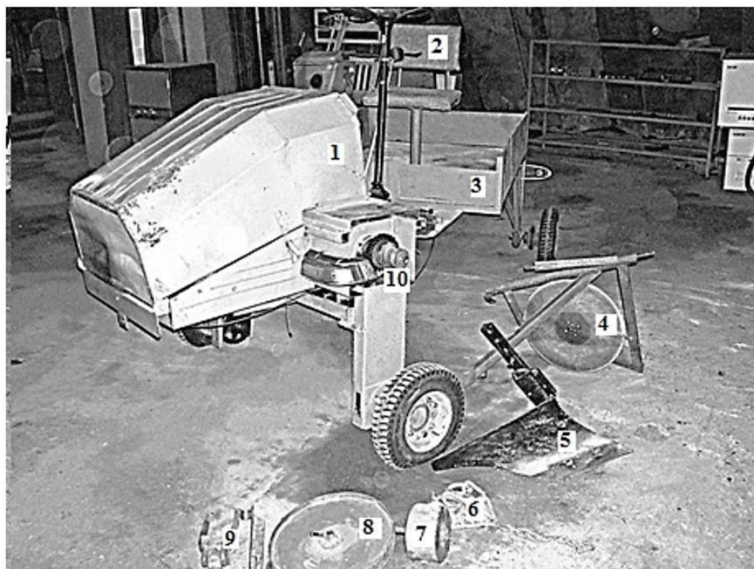


Рис. 1. Лесохозяйственный мини-трактор-концепт АЛТИ-САФУ с компонентами технологического шлейфа: 1 – силовой модуль; 2 – модуль ручного управления; 3 – грузовой кузов универсального прицепа; 4 – сферический дисковый сошник сеялки; 5 – плуг; 6 – боронка сеялки; 7 – высеивающее устройство лабиринтного типа; 8 – опорный каток сеялки; 9 – элемент крепления навесных орудий; 10 – боковой (правый) вал отбора мощности

Fig. 1. Forestry minitractor – concept of ALTI-NArFU with components of the technological trail: 1 – power module; 2 – manual operation module; 3 – cargo body of the multipurpose trailer; 4 – spherical disc opener of the seeder; 5 – plow; 6 – seeder harrow; 7 – labyrinth-type seeding device; 8 – seeder track roller; 9 – fastener of mounted equipment; 10 – side (right) power take-off

Следует отметить, что порталная компоновка ходовой системы в специфических условиях лесохозяйственных микропрофилей на пути движения будет оказывать существенное влияние на энергозатраты (расход топлива) для перемещения трактора. Причем положение центра тяжести агрегата, связанное с конструкцией портала и колес ходовой системы, будет основным влияющим конструктивным фактором при прочих равных условиях. Поэтому решение задачи оценки расхода топлива трактором в зависимости от конструктивных параметров его ходовой системы в условиях случайного микропрофиля пути актуально.

Цель исследования – разработка методики оценки топливной экономичности порталного лесохозяйственного трактора в стохастических условиях эксплуатации.

Для решения данной проблемы использовались методы общей [1, 2, 7] и статистической [8, 11, 15] динамики мобильных технологических машин.

В связи с тем, что поставленная задача решается в первом приближении, были приняты следующие общие допущения:

- динамическая система является стационарной линейной;
- исследуется прямолинейный установившийся режим движения;
- отсутствует продольный уклон опорной поверхности движения;

при движении наблюдается стохастический поперечный уклон по осям ходовой системы;

колеса ходовой системы идеализируются как абсолютно жесткие;

трактор не имеет упругой подвески.

Рассматривается движение шарнирно-сочлененного портального лесохозяйственного трактора (4К4) в режиме транспортировки некоторого груза. Объект, который перевозится, расположен в кузове, смонтированном на задней (по ходу движения) секции шасси. Исходная расчетная схема для последующих выкладок представлена на рис. 2.

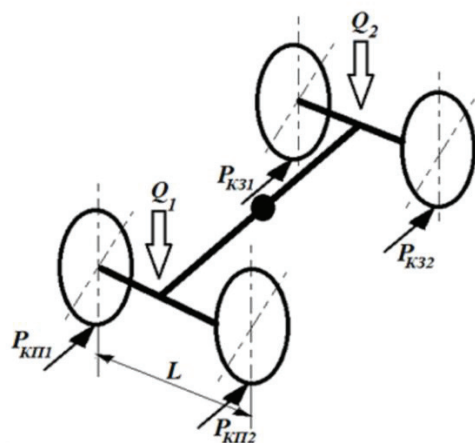


Рис. 2. Расчетная схема шасси: L – колея колес секций шасси, м; Q_1 и Q_2 – вес передней и задней секций трактора, Н; $P_{KП1}$ и $P_{KП2}$ – касательная сила на переднем правом и переднем левом колесах трактора, Н; $P_{KЗ1}$ и $P_{KЗ2}$ – касательная сила на заднем правом и заднем левом колесах трактора, Н
Fig. 2. Computational model of the chassis: L – wheel track of the chassis sections, m; Q_1 and Q_2 – weight of the front and rear sections of the tractor, N; $P_{KП1}$ and $P_{KП2}$ – tangential force on the front right and front left wheels of the tractor, N; $P_{KЗ1}$ and $P_{KЗ2}$ – tangential force on the rear right and rear left wheels of the tractor, N

Часовой расход топлива G_T (кг/ч) двигателя внутреннего сгорания привода машины [3, 4, 19]:

$$G_T = \frac{3600 \partial_{ц} \omega_{кв} C_d}{\pi \tau_d}, \quad (1)$$

где $\partial_{ц}$ – цикловая подача, кг; $\omega_{кв}$ – угловая частота вращения коленчатого вала двигателя, c^{-1} ; C_d – число цилиндров; π – Архимедово число; τ_d – тактность двигателя.

Эффективный крутящий момент M_e (Н·м), развиваемый рассматриваемым двигателем, представим в виде следующего соотношения:

$$M_e = \frac{10^3 H_u C_d \partial_{ц} \eta_e}{\pi \tau_d}, \quad (2)$$

где H_u – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; η_e – эффективный коэффициент полезного действия двигателя.

Выразим из (2) цикловую подачу $\partial_{ц}$ через M_e и подставим результат в формулу (1), тогда

$$G_T = \frac{3,6 \omega_{кв} M_e}{\eta_e H_u}. \quad (3)$$

Для изучаемого случая

$$M_e = \frac{P_K R}{i_{тп} \eta_{тп}}, \quad (4)$$

где P_K – касательная сила на колесах трактора, Н; R – радиус колеса, м; $i_{тр}$ – передаточное число трансмиссии; $\eta_{тр}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии.

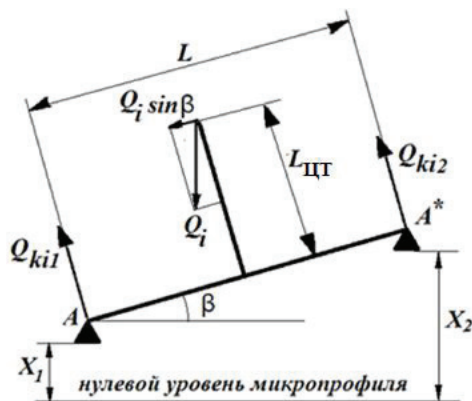
С учетом изложенных выше предпосылок

$$P_K = P_{K\Pi1} + P_{K\Pi2} + P_{K31} + P_{K32}. \quad (5)$$

Слагаемые правой части соответствия (5) проиллюстрированы выше на рис. 2. На рис. 3 представлена расчетная схема для вида спереди на ось трактора.

Рис. 3. Расчетная схема системы «микропрофиль–компоновка портала»: т. A и т. A^* интерпретируют опору правого и левого (по ходу машины) колес; L – колея колес оси; X_1 и X_2 – случайные величины выступов или впадин микропрофиля пути по колеям колес; Q_i – масса i -й секции трактора; Q_{ki1} и Q_{ki2} – нормальная реакция опорной поверхности по соответствующим колесам бортов портала (1 – правого, 2 – левого), Н; $L_{ЦГ}$ – высота положения центра тяжести секции относительно условной опорной поверхности $A-A^*$, м

Fig. 3. Computational scheme of the microprofile – straddle layout system: point A and point A^* interpret the support of the right and left (in the machine's direction) wheels; L – axle wheel tracks; X_1 and X_2 – random values of peaks or valleys of the microprofile of the path along the wheel tracks; Q_i – weight of the i -th section of the tractor (Π – front, 3 – rear); Q_{ki1} and Q_{ki2} – normal response of the support surface on the corresponding wheels of the sides of the straddle (1 – right, 2 – left), N; $L_{ЦГ}$ – height of the position of the center of gravity of the section relative to the conditional supporting surface $A-A^*$, m



Ввиду малых значений X_1 и X_2 (рис. 3), допустимо предположить, что текущий случайный угол β поперечного наклона условной оси колес порталов трактора

$$\beta \approx \sin \beta = \frac{X_2 - X_1}{L}. \quad (6)$$

Предположим, что $L = L_{ЦГ}$ по секциям шасси трактора. С учетом этого допущения имеем

$$Q_{ki1} \approx 0,5Q_i + Q_i \sin(\beta) \frac{L_{ЦГ}}{L}; \quad (7)$$

$$Q_{ki2} \approx 0,5Q_i - Q_i \sin(\beta) \frac{L_{ЦГ}}{L}. \quad (8)$$

Касательную силу на колесах правого P_{ki1} и левого P_{ki2} борта трактора можно представить как $P_{ki1} = Q_{ki1}f$; $P_{ki2} = Q_{ki2}f$, где i – секция трактора; f – коэффициент сопротивления качению колес трактора.

Представим в развернутом виде уравнение (5):

$$P_K = \left[Q_{ki1} \left(0,5 + \sin(\beta) \frac{L_{цг}}{L} \right) + Q_{ki2} \left(0,5 - \sin(\beta) \frac{L_{цг}}{L} \right) + Q_{ki1} \left(0,5 + \sin(\beta) \frac{L_{цг}}{L} \right) \right] \times \\ \times f + Q_{ki2} \left(0,5 - \sin(\beta) \frac{L_{цг}}{L} \right) f. \quad (9)$$

Уравнение (9) отражает компонент тягового баланса исследуемого тракторного агрегата с учетом оговоренных выше допущений. При этом структура распределения реакций опор агрегата представлена в статике, без учета стохастического характера микропрофиля пути движения [17, 22].

Введем в уравнение (9) параметр $\Delta\beta(t)$ – текущее случайное изменение угла β при движении тракторного агрегата при случайном изменении параметров микропрофиля X_1 и X_2 . В результате все слагаемые правой части формул (5) и (9) представим в общем виде:

$$\Delta P_K(t) = \left(0,5Q_i + Q_i \sin(\Delta\beta(t)) \frac{L_{цг}}{L} \right) f, \quad (10)$$

где $\Delta P_K(t)$ – текущее случайное изменение касательной силы тяги на колесах секции i и соответствующих бортов на порталах трактора j .

Применив к формуле (10) преобразование Лапласа [5, 15, 21], получим изображение в операторном виде:

$$P_K(s) = Q_i \left[\frac{1}{2s} + \frac{L_{цг}}{L} \left(\frac{\beta_0}{\beta_0^2 + s^2} \right) \right] f, \quad (11)$$

где s – переменная Лапласа (оператор дифференцирования); β_0 – математическое ожидание угла β , рад (рис. 3).

В аспекте статистической динамики данный результат справедлив для всех опор рассматриваемого тракторного шасси, т. е. Лапласово изображение $P_K(s)$ суммарной касательной силы тяги (5) можно представить как

$$P_K(s) = Q_K \left[\frac{1}{2s} + \frac{L_{цг}}{L} \left(\frac{\beta_0}{\beta_0^2 + s^2} \right) \right] f, \quad (12)$$

где Q_K – полная масса тракторного агрегата в исследуемом режиме, Н.

Результаты исследования и их обсуждение

Следует отметить, что математическое ожидание β_0 имеет непосредственную зависимость от математических ожиданий X_{10} и X_{20} обозначенных выше случайных характеристик микропрофиля X_1 и X_2 . Эта зависимость следует из принятого соответствия (6):

$$\beta_0 \approx \frac{X_{20} - X_{10}}{L}. \quad (13)$$

В качестве входного процесса при движении колес по микропрофилю под их колесами целесообразно принять текущее случайное изменение процесса $\Delta X(t)$ разности случайных изменений процессов $\Delta X_2(t)$ и $\Delta X_1(t)$.

Основываясь на допущении, принятом при обосновании выражения (6), и с учетом рис. 3, получаем

$$\Delta X(t) = \Delta X_2(t) - \Delta X_1(t) = L \operatorname{tg}(\Delta\beta(t)). \quad (14)$$

Преобразуя по Лапласу данное соотношение, с учетом малых значений текущих углов β запишем внешнее возмущение от микропрофиля пути движения мобильного агрегата:

$$X(s) = L \left(\frac{\beta_0}{s} \right). \quad (15)$$

Исходя из известных положений теории случайных функций [4, 6, 13], получим после промежуточных преобразований передаточную функцию динамической системы «часовой расход порталного трактора – микропрофиль пути по колесам колес порталов» в предположении ее линейности:

$$G_T(s) = C \frac{P_K(s)}{X(s)} = C Q_K \left[\frac{L(\beta_0^2 + s^2) + 2sL_{\text{ЦГ}}\beta_0}{2L^2(\beta_0^2 + s^2)\beta_0} \right]. \quad (16)$$

Основываясь на положениях преобразования Лапласа и с учетом правил действия над комплексными числами, зависимость (16) преобразуем в квадрат модуля частотной характеристики (амплитудно-частотной характеристики – АЧХ) рассматриваемой динамической системы:

$$|G_T(\omega)|^2 = C^2 Q_K^2 \left[\frac{L(\omega^2 - \beta_0^2) + 2\omega L_{\text{ЦГ}}\beta_0}{2L^2(\omega^2 - \beta_0^2)\beta_0} \right]^2. \quad (17)$$

В формулах (16) и (17) имеется множитель – некоторый собственный параметр системы:

$$C = \frac{3,6\omega_{\text{кв}} R f}{\eta_e H_u i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}, \quad (18)$$

а также текущая угловая частота рассматриваемого спектра исследуемой динамической системы ω , рад/с.

Выводы

1. Найденная аналитическая амплитудно-частотная характеристика позволяет оценивать часовой расход топлива изучаемым тракторным агрегатом в транспортном режиме при заданных проектных и конструктивных параметрах и условиях эксплуатации. Необходима косвенная экспериментальная оценка математического ожидания угла β_0 в виде зависимости от математических ожиданий X_{10} и X_{20} прямых пути X_1 и X_2 по колесам колес порталов тракторного агрегата.

2. С позиции статистической динамики мобильных машин амплитудно-частотная характеристика (17) позволяет для заданных параметров трактора при известной спектральной плотности процесса изменения угла β и на основе теоремы Винера–Хопфа [5, 8, 20] оценивать спектральную плотность, а в итоге и дисперсию часового расхода топлива исследуемым тракторным порталным шасси. Математическое ожидание расхода топлива находится расчетно-

эмпирически на основе корреляционной теории случайных процессов путем определения интеграла импульсной характеристики переходной функции исследуемой динамической системы.

3. Следует учесть, что для порталного трактора весьма важным является выбор такого параметра, как высота положения центра тяжести относительно условной опорной поверхности $L_{ЦТ}$, который зависит как от назначения машины, так и от ее конструкции, например от радиуса колес.

4. Анализ представленных выше математических расчетов указывает на то, что при создании исследуемого объекта необходимо обеспечить такую характеристику (17), которая должна минимизировать дисперсию часового расхода топлива при случайном внешнем воздействии микропрофиля на машину. При этом имеется неоднозначность влияния компонентов ходовой системы, в частности шин колес: увеличение радиуса шин (при прочих равных условиях), с одной стороны, приводит к возрастанию параметра $L_{ЦТ}$ и, как следует из формулы (16), к росту часового расхода топлива, с другой – как известно [9, 14, 16], снижает коэффициент f , а значит и часовой расход топлива (см. формулы (9), (18)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анисимов Г.М., Жендаев С.Г., Жуков А.В. Лесные машины (тракторы, автомобили, тепловозы) / под ред. Г.М. Анисимова. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 512 с. [Anisimov G.M., Zhendayev S.G., Zhukov A.V. *Forest Machines (Tractors, Cars, Diesel Locomotives)*. Ed. by G.M. Anisimov. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 512 p.].
2. Антипин В.П., Варава В.И., Каршев Г.В. Энергозатраты трактора К-744Р в транспортном режиме // Тракторы и сельхозмашины. 2009. №6. С. 15–18. [Antipin V.P., Varava V.I., Karshev G.V. Energy Consumption of the K-744R Tractor in Transport Mode. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2009, no. 6, pp. 15–18].
3. Антипин В.П., Власов Е.Н., Десято А.Н. Часовой расход топлива трелевочным трактором в условиях эксплуатации // Повышение потенциальных свойств машин и механизмов лесного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. СПб.: СПбГЛТА, 2001. С. 13–19. [Antipin V.P., Vlasov E.N., Desyatov A.N. Hourly Fuel Consumption of a Skidding Tractor under Operation. *Improving the Potential Properties of Machines and Mechanisms of the Forestry Complex: Interuniversity Collection of Academic Papers*. Saint Petersburg, GLTA Publ., 2001, pp. 13–19].
4. Антипин В.П., Дурманов М.Я., Каршев Г.В. Производительность, энергозатраты и ресурс машинно-тракторного агрегата. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 484 с. [Antipin V.P., Durmanov M.Ya., Karshev G.V. *Productivity, Energy Consumption and Resource of a Machine-Tractor Unit*. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2017. 484 p.].
5. Гоберман В.А., Гоберман Л.А. Технология научных исследований – методы, модели, оценки. 2-е изд., стереотип. М.: МГУЛ, 2002. 390 с. [Goberman V.A. *Goberman L.A. Research Technology – Methods, Models and Assessment*. Moscow, MGUL Publ., 2002. 390 p.].
6. Коптилов В.И. Аналитические методы определения эксплуатационного расхода топлива и оценки топливной экономичности автомобилей: моногр. Тюмень: Вектор Бук, 2008. 344 с. [Koptilov V.I. *Analytical Methods for Determining the Operational Fuel Consumption and Assessing the Fuel Efficiency of Cars: Monograph*. Tyumen, Vector Book Publ., 2008. 344 p.].
7. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2014. 506 с. [Kutkov G.M. *Tractors and Cars: Theory and Technological Properties*. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 506 p.].

8. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1981. 382 с. [Lurie A.B. *Statistical Dynamics of Agricultural Machines*. Moscow, Kolos Publ., 1981. 382 p.].

9. Мухамадьяров Ф.Ф., Остальцев В.П. Деформация почвы и энергозатраты на передвижение тракторов // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2010. № 2(17). С. 72–75. [Mukhamadjarov F.F., Ostal'tsev V.P. Deformation of Soil and Energy-Costs at Movement of Tractors. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* [Agricultural Science Euro-North-East], 2010, no. 2(17), pp. 72–75].

10. Мясичев Д.Г. Статистическая динамика машин и оборудования лесного комплекса (в примерах). Архангельск: САФУ, 2015. 126 с. Режим доступа: <http://narfu.ru/university/library/books/1834.pdf> (дата обращения: 13.12.19). [Myasishchev D.G. *Statistical Dynamics of Machines and Equipment of the Forestry Complex (in Examples)*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 126 p.].

11. Мясичев Д.Г. Синтез структуры лесохозяйственного механизированного комплекса на базе малогабаритного мобильного силового модуля // *Лесотехн. журн.* 2017. Т. 7, № 1(25). С. 196–204. [Myasishchev D.G. Synthesis of Structure of Forest Mechanized Complex Based on a Compact Mobile Power Module. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2017, vol. 7, no. 1(25), pp. 196–204]. DOI: [12737/25211](https://doi.org/10.12737/25211)

12. Мясичев Д.Г., Прокопьев А.Ф. Обоснование параметров и выбор компонентов шасси мини-форвардера для рубок ухода в молодняках // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2009. № 3. С. 53–56. [Myasishchev D.G., Prokopjev A.F. Substantiation of Parameters and Components Choice of Miniforwarder Chassis for Young Growth Tending. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 3, pp. 53–56]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e83/e8352f58a992d1e40074132131accc00.pdf>

13. Мясичев Д.Г., Путинцев С.А. Оптимизация расхода топлива роторного измельчителя растительных остатков // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2017. № 1. С. 129–140. [Myasishchev D.G., Putintsev S.A. Fuel Optimization of a Rotary Chopper for Plant Residues. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 129–140]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.1.129](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.129), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/1ad/myasishchev.pdf>

14. Хабардин С.В., Михайлов Н.А. Методы определения расхода топлива при тяговых испытаниях тракторов и их анализ // *Вестн. РГСХА*. 2015. № 68. С. 114–122. [Khabardin S.V., Mikhailov N.A. Evaluation Methods of Fuel Consumption on Drawbar Tests of Tractors and Its Analysis. *Vestnik IrGSHA*, 2015, no. 68, pp. 114–122].

15. Шупляков С.М. Колебания и нагруженность трансмиссии автомобиля. М.: Транспорт, 1974. 328 с. [Shuplyakov S.M. *Oscillations and Loading of Vehicle Transmission*. Moscow, Transport Publ., 1974. 328 p.].

16. Čiplienė A., Gurevičius P., Janulevičius A., Damanauskas V. Experimental Validation of Tyre Inflation Pressure Model to Reduce Fuel Consumption during Soil Tillage. *Biosystems Engineering*, 2019, vol. 186, pp. 45–59. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2019.06.023](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.023)

17. Grisso R.D., Kocher M.F., Vaughan D.H. Predicting Tractor Fuel Consumption. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, vol. 20(5), pp. 553–561. DOI: [10.13031/2013.17455](https://doi.org/10.13031/2013.17455)

18. Janulevičius A., Šarauskis E., Čiplienė A., Juostas A. Estimation of Farm Tractor Performance as a Function of Time Efficiency during Ploughing in Fields of Different Sizes. *Biosystems Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 80–93. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2019.01.004](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.004)

19. Mileusnić Z.I., Petrović D.V., Đević M.S. Comparison of Tillage Systems according to Fuel Consumption. *Energy*, 2010, vol. 35, iss. 1, pp. 221–228. DOI: [10.1016/j.energy.2009.09.012](https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.012)

20. Osinenko P., Streif S. Optimal Traction Control for Heavy-Duty Vehicles. *Control Engineering Practice*, 2017, vol. 69, pp. 99–111. DOI: [10.1016/j.conengprac.2017.09.010](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.09.010)

21. Riley K.F., Hobson M.P., Bence S.J. *Mathematical Methods for Physics and Engineering*. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 1304 p.

22. Vilde A., Pirs E. Simulation of the Impact of the Energetic Characters of Tractors and Machines on the Working Efficiency of the Soil Tillage Units. *Proceedings of the 7th International Workshop on Modeling & Applied Simulation, Campora S. Giovanni, Italy, September 17–19, 2008*. Rende, Italy, DIPTM, 2008, pp. 314–320.

FUEL CONSUMPTION OF A STRADDLE FORESTRY TRACTOR IN CONSIDERATION OF STOCHASTIC FACTORS

D.G. Myasishchev, Doctor of Engineering, Prof.

D.N. Shostenko, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.

A.V. Serebrennikov, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAY-1917-2020](https://orcid.org/0000-0002-2935-860X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2935-860X>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: d.myasishchev@narfu.ru, d.shostenko@narfu.ru, serebrennikov.a@edu.narfu.ru

Currently, there is a tendency for creation a cross-functional tractor line of drawbar category. Everything is very practical and consistent from the perspective of the producer of such tractors. The number of modular units and assemblies is minimized, and the list of components is reduced. However, all this is acceptable up to a certain limit, which is outlined by the technological trail of the tractor being created and the specifics of its application. The article deals with a straddle forestry tractor of drawbar category of 6 kN. It is assumed that the tractor has a variety of trains of working bodies and machines, as well as a cargo bed on the pin-joint section. The cargo mode of the unit's movement is examined by a random microprofile under the wheels in tracks. The problem of statistical dynamics is solved. As an output process, a Laplace image is drawn for the hourly fuel consumption of the tractor engine. As an input process, a Laplace image is drawn for an external random action from the microprofile along the tracks. Herewith, the transfer function of the hourly fuel consumption is determined, which allows to estimate the spectral density of the tractor's hourly consumption and the dispersion of the hourly consumption for the given microprofile of the tracks. In addition, using the correlation theory of random processes, one can estimate the mathematical expectation of the hourly fuel consumption during transport operations. In the final analysis, it is possible to solve the optimization problem. Namely, the choice of such undercarriage tires, which provide a minimum dispersion and mathematical expectation of the hourly fuel consumption of the transport unit. The situational combination comes down to the fact that an increase in the tire radius on one side increases the height of the center of gravity of the unit, which increases the hourly fuel consumption. On the other hand, an increase in the radius of the tire contributes to a reduction in the coefficient of rolling resistance of a wheel, and hence a decrease in fuel consumption. Thus, there is a problem of discrete optimization, namely, the choice of a tire design, in which the energy costs of the transport unit are minimized.

For citation: Myasishchev D.G., Shostenko D.N., Serebrennikov A.V. Fuel Consumption of a Straddle Forestry Tractor in Consideration of Stochastic Factors. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 145–154. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-5-145-154](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-145-154)

Keywords: straddle tractor, microprofile, fuel consumption, transfer function, optimization.

Поступила 13.12.19 / Received on December 13, 2019



УДК 674.05:620.16

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-155-165

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ МАШИН

Г.А. Пилюшина, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>

П.Г. Пыриков, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-7458>

Е.А. Памфилов, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>

А.Я. Данилюк, аспирант

В.В. Капустин, аспирант; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>

Брянский государственный технический университет, б-р 50 лет Октября, д. 7,
г. Брянск, Россия, 241035; e-mail: rector@tu-bryansk.ru, pyrikovpg@mail.ru

Использование модифицированной древесины в различных парах трения лесопромышленных машин и технологического оборудования во многом обусловлено высокими показателями ее износостойкости, низким коэффициентом трения и хорошими диссипативными характеристиками. Положительные свойства композиционных материалов достигаются при использовании технологий объемного модифицирования и имплантирования антифрикционных и теплопроводящих элементов, а также путем формирования композита из измельченной древесины с добавлением модифицирующих присадок и объемного армирования. Расширение сферы использования композиционных материалов в конструкциях узлов с фрикционными парами скольжения делает необходимым проведение исследований их работоспособности и условий формирования высокого уровня триботехнических параметров: износостойкости, антифрикционности, теплостойкости и т.д. Недостаточность информации о влиянии факторов, обеспечивающих функциональные характеристики материалов на основе древесины, в том числе теплопроводности и вибропоглощения, существенно осложняет решение ряда конструкторских и технологических задач при разработке и изготовлении подшипниковых узлов. Поэтому целью работы являлось исследование условий контактного взаимодействия подшипников скольжения из древесно-металлических композиционных материалов с учетом реологических эффектов, а также выработка путей управления их триботехническими параметрами за счет изменения структуры, состава и фазового наполнителя. Для этого разработаны модели подшипников разных типов, позволяющие создавать во втулках и вкладышах регламентированное напряженно-деформационное состояние. Исследования работоспособности подшипников позволили отметить существенное проявление виброгасящих свойств при использовании в составе композита измельченных фракций, находящихся во взвешенном состоянии. Повышенные антифрикционные свойства достигаются при модифицировании древесины электролитической медью, а технологичность изготовления втулки подшипника – при формировании непосредственно на месте установки опоры. В отличие от большинства применяемых антифрикционных материалов древесина втулок сохраняет стабильность структуры в условиях объемного сжатия при отрицательных

и положительных температурах, а процессы износа, протекающие на контактных поверхностях древесно-металлических подшипников, сопровождаются уплотнением материала втулки. Последующее разрушение носит преимущественно усталостный характер, инициируемый динамикой колебаний и возмущений системы, поэтому важной частью дальнейших исследований является оценка релаксационной способности древесно-металлических композитов при ударно-вибрационном нагружении с оптимизацией их состава по данному критерию.

Для цитирования: Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Памфилов Е.А., Данилюк А.Я., Капустин В.В. Модифицирование древесины для создания подшипников скольжения лесопромышленных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 155–165. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-155-165

Финансирование: Проект «Исследование и создание подшипников скольжения повышенной износостойкости на основе древесно-металлических композиционных материалов» в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект № 9.10677.2018/11.12).

Ключевые слова: триботехнические параметры, материалы на основе древесины, электролитическое меднение, износостойкость, теплопроводность, напряженное состояние.

Введение

Перспектива использования в конструкциях лесопромышленных машин и технологического оборудования узлов и конструктивных элементов с фрикционными парами скольжения делает актуальным проведение исследований их работоспособности и выработку путей ее повышения за счет создания новых конструкций и технологических основ обеспечения высокого уровня их триботехнических параметров: износостойкости, антифрикционности, теплоустойчивости и т.д. Разрозненность и неполнота сведений о влиянии факторов на технические свойства материалов на основе древесины в сочетании с необходимостью комплексного обеспечения функциональных характеристик, в том числе теплопроводности и виброгасящих свойств, существенно осложняют решение ряда проектно-конструкторских и технологических задач при их разработке и изготовлении.

При этом представляется перспективным осуществление глубокого модифицирования используемой древесины в ходе получения антифрикционных композиций, к числу которых относятся слоистая и измельченная древесина в комплексе с разного рода металлическими и неметаллическими составляющими: сталь–органоволокнит, олово–медь–алюминий; олово–цинк–свинец, капролон–фторопласт–эпоксидная смола–сталь, политетрафторэтилен–медь, бронза–тефлон–свинец; углерод-керамическими композитами; композитами на основе меди–олова–графита, меди–олова–хрома–никеля; свинцово-оловянистыми бронзами, фторопластами, серыми и антифрикционными чугунами, а также разного рода покрытиями (дисульфидом молибдена, графитом и т.д.) [1, 5, 11].

Вместе с тем, при большом спектре положительных свойств этих материалов, использование их в промышленности, в частности при изготовлении подшипников скольжения, существенно ограничивается недостатком информации, позволяющей назначать их оптимальные состав и структуру. Значительную сложность также вносит отсутствие сведений для выбора эффективных процессов формирования, включая механическую обработку, в связи с недостаточной стойкостью применяемых режущих инструментов.

Следует заметить, что использование древесины в качестве антифрикционного материала в подшипниках скольжения представляется возможным преимущественно в модифицированном состоянии, позволяющем обеспечить необходимые механические и теплофизические свойства [4, 11]. При этом из анализа их производства следует отметить ограниченный объем информации, касающийся аспекта проектирования антифрикционных материалов по критерию демпфирования и динамической стабильности [2, 3].

В отличие от большинства применяемых антифрикционных материалов древесина втулок сохраняет стабильность структуры в условиях объемного сжатия при отрицательных и положительных температурах (-80 до 150 °C), что выражается в исключении разупрочнения за счет пластической деформации в сухом состоянии и упругой – во влажном (выше предела гигроскопичности).

Обладея значительной эластичностью при сжатии при повышении температуры и влажности, древесина облегает шероховатости поверхности вала, увеличивая тем самым фактическую площадь контакта.

Процессы износа, протекающие на контактных поверхностях древесно-металлических подшипников, также выражаются в иницирующихся колебаниях и возмущениях динамического характера [12] и сопровождаются уплотнением материала втулки с его последующим разрушением, преимущественно усталостного характера. Существенным (до 20...30 % относительно первоначальных значений) колебаниям влажности даже модифицированной древесины сопутствует цикличность приработки и сложности сохранения условий взаимозаменяемости при монтаже и эксплуатации опор.

Тем не менее волокнистая структура древесины способна диссипировать энергию колебаний, передающуюся в объеме композита между волокнами, а также слоями ранней (менее плотной) и поздней древесины. Причем декремент колебаний имеет максимум в слоях, характеризующихся меньшим значением модуля упругости.

Поэтому целью исследования являлась выработка путей управления условиями контактного взаимодействия втулок и вкладышей подшипников скольжения с учетом реологических эффектов, возникающих в древесно-металлических композиционных материалах, с последующей подготовкой рекомендаций по формированию их структуры, фазового состава и антифрикционных свойств и по условиям технологической доэксплуатационной подготовки.

Объекты и методы исследования

Многообразие предлагаемых конструктивных решений подшипников скольжения, принятых в качестве объектов исследования, сгруппировано в четыре основные разновидности: подшипники скольжения линейного типа (ролики ленточных и цепных транспортеров, пальцы соединительных муфт, ползуны прессов, лесопильных рам, диски зубчатых колес, сальниковые уплотнения, уплотнительные кольца компрессоров); подшипники скольжения сферического типа (шарниры карданных передач, насосов, компрессоров), используемые при небольших скоростях в присутствии осевой нагрузки, колебаний и перекосов валов; подшипники скольжения упорного типа (опоры поворотных столов, опоры манипуляторов, вкладыши валов редукторов), воспринимающие преимущественно радиальные силы, и осевые (упорные) под-

шипники, рассчитанные на восприятие в основном осевого усилия; рычажные подшипники (элементы подвески автомобилей и тракторов), воспринимающие значительные радиальные и двухсторонние осевые усилия [8, 10].

Эксплуатация таких подшипников должна обеспечиваться в широких диапазонах температурного (от -70 до $+150$ °С) и механического (до $1,0$ кг/мм² – подпятники) нагружения при окружных скоростях вала до 5 м/с и значительной несоосности, в условиях граничной смазки, жидкостного и газового трения [7, 9].

С учетом отмеченного, разработана новая конструкция подшипников скольжения, предполагающая изготовление втулок из модифицированной электролитической медью древесины с последующим гнутьем и формированием в них технологических напряжений сжатия (см. рисунок).

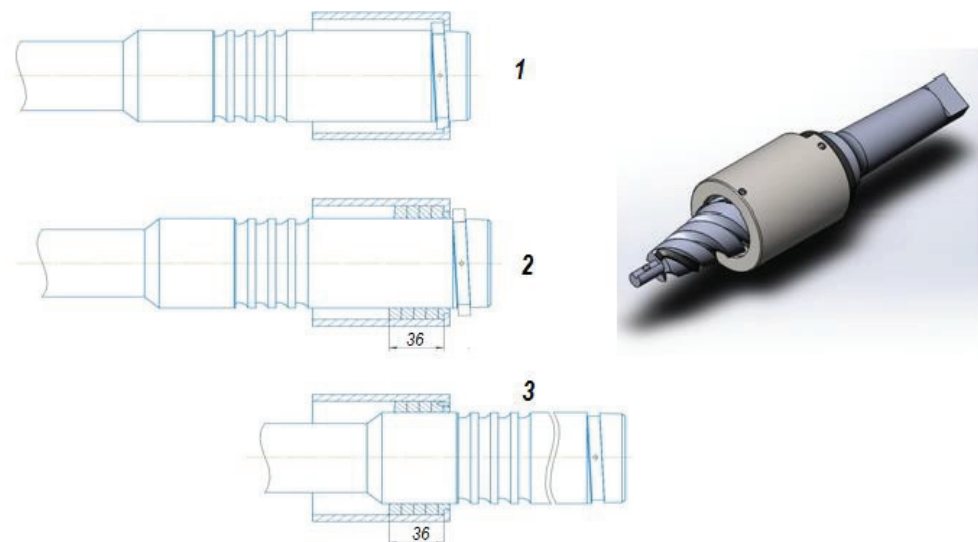


Схема формирования втулки подшипника с технологическими остаточными напряжениями: 1 – штифтование заготовки в винтовой канавке пуансона; 2 – формирование втулки при навивке заготовки;

The scheme of formation of a bearing sleeve with technological residual stresses: 1 – pinning a workpiece in a spiral flute; 2 – formation of a sleeve when winding on a workpiece; 3 – hole calibration

В разработанном способе обеспечивается изготовление втулки с формируемым уровнем напряженного состояния сжатия за счет подпрессовки и заневоливания заготовки в форме бруска при ее размещении в пазах резьбы пуансона между внутренней поверхностью обоймы и последующем свертывании пуансона в обойму. При этом разница между наружным диаметром пуансона и внутренней поверхностью обоймы соответствует номинальной толщине втулки; пуансон изготавливается по трехзаходной спирали в виде усеченного конуса, основание которого при полном завертывании в обойму обеспечивает расчетное радиальное давление подпрессовки, а витки резьбы в сечении имеют геометрию трапецевидного клина.

Для увеличения теплопроводности подшипника древесина втулки, предназначенная для прессования, подвергается модифицированию медью в

ходе электролиза. Перед модифицированием заготовки втулки вымачиваются в глицерине, после чего помещаются в резервуар с ацетоном и выдерживаются 20 ч под давлением 1,5 атм. После этого следуют выдержка заготовок в электролите в течение нескольких суток и электролиз, в ходе которого в разветвленных анатомических микрообъемах древесины восстанавливается медь. Образующиеся в ходе электролиза медные структурные составляющие композита обеспечивают теплопровод с поверхности трения «вал–втулка» по направлению к наружной обойме подшипника.

Испытания втулок подшипников на изнашивание проводились при числе оборотов вала в диапазоне от 300 до 900 мин⁻¹. В качестве критерия, ограничивающего продолжительность экспериментов, принимались признаки эффекта заклинивания вала при достижении уровня энергопотребления двигателя 0,95 % от номинального значения.

Теплопроводность образцов исследовалась по ГОСТ 21523.3.2–93 «Древесина модифицированная. Метод определения теплопроводности»; коэффициент трения – по ГОСТ Р 55951–2014 «Древесина модифицированная. Метод определения износостойкости и коэффициента трения»; состав продуктов изнашивания на поверхностях трения втулок устанавливался при проведении рентгеноспектрального анализа (РСА) согласно типовым методикам его реализации; контроль температуры в области трения в ходе испытаний осуществлялся термопарой.

Результаты исследования и их обсуждение

Некоторые сравниваемые параметры рассматриваемых подшипников скольжения приведены в таблице.

Параметры подшипников скольжения, прошедших испытания по схеме «втулка–металлический вал»

Показатель	Подшипник из прессованной древесины с нанокристаллической целлюлозой и никелевым покрытием [6]	Предложенный подшипник (см. рисунок)
Плотность, кг/м ³	1400	1450
Влажность, %	2	2
Содержание, %:		
никеля	5	–
меди	–	37
Теплопроводность, Вт/(м·К)	16	48
Коэффициент трения при $P = 3,5$ МПа, $v = 1,0$ м/с	0,05	0,02
Износ, мкм на 10 тыс. м пути	40	22
Допустимая температура в зоне трения, °С	160	185

Улучшение антифрикционных свойств пары трения «втулка–вал» при применении в качестве вкладыша предлагаемого древесно-металлического антифрикционного композита основано на явлении избирательного переноса. Содержание меди в модифицированной древесине в количестве до 40 % обеспечивает теплопроводность порядка 370...400 Вт/(м·К), что вполне достаточ-

но для отвода тепла из зоны трения и улучшения антифрикционных свойств на основе отмеченного эффекта.

Из многочисленных работ в области трибологии известно, что избирательный перенос в результате протекания химических и физико-химических процессов приводит к автокомпенсации износа и снижению трения, обеспечивает предохранение поверхности трения от окисления благодаря образованию восстановительной смазочной среды, осаждению продуктов износа в зоне контакта и формированию пленок, уменьшающих трение и усиливающих защиту поверхностей от износа. Избирательный перенос наблюдается в паре трения «медный сплав–сталь», что соответствует, в частности, структуре материала втулки разработанного подшипника скольжения.

Фактором, стимулирующим формирование граничной пленки, выполняющей антифрикционную функцию, является гидростатическое давление в древесине, обеспечиваемое предварительно созданными технологическими напряжениями во втулке.

Деструкция граничной пленки, происходящая в результате астационарных режимов работы подшипника, приводит к резкому возрастанию градиента температуры на контактных поверхностях. В этих условиях важно обеспечить состояние структуры втулки, характеризующееся повышенной теплопроводностью.

Изнашиваемыми структурными составляющими древесины оказываются главным образом стенки клеток, в которых основную механическую составляющую реализуют эластичная и высокопрочная на разрыв целлюлоза и хрупкий и прочный на сжатие лигнин совместно с пектиновыми веществами.

В области величин сближения, соответствующих насыщенному контакту, с ростом температуры трения происходит размягчение лигнина с повышением его пластичности. Коллоидная структура стенок клеток способствует аморфному внедрению лигнина в межмицеллярные пространства, вследствие чего имеет место рост плотности структуры до критических значений. Фактором, тормозящим данный процесс, является модифицирование древесины армирующей фазой (например, электролитически восстановленными металлами); при этом основная масса древесины, образуя в ходе изнашивания сеть микроскопических каналов, по которым циркулирует смазочный материал и уносятся продукты износа, обеспечивает эффект приработки.

Волокнистая структура клеточных стенок – макрофибрилл предотвращает попадание свободного и образующегося вследствие деструкции целлюлозы абразива в контактную среду, в результате чего он преимущественно шаржируется в полости мелких капилляров.

При взаимодействии с металлическим валом отмечается интенсивное изнашивание вкладышей, что, по-видимому, обусловлено разрывом связи целлюлозных макромолекул с повышением температуры выше допустимых значений одинаково для пород разной плотности. Учитывая, что в контактной зоне находятся гемицеллюлозы, лигнин и пектиновые вещества, при разрыве химической связи О-Н, взаимодействующей с модификатором смазки, образуется высокоориентированный граничный смазочный слой.

Для предотвращения деструкции древесины давление и скорость должны ограничиваться значениями: $P \leq 3,5$ МПа и $v \leq 3,0$ м/с (при температуре в контактной зоне около 150 °С).

Однако при этом данные параметры оказываются в 7–10 раз больше, чем у большинства антифрикционных материалов, что согласуется со сведениями, приведенными в исследовании [1]. Таким образом, стабильная работа подшипников из пластифицированной древесины обеспечивается при удельной нагрузке $P = 10$ МПа и окружной скорости вала $v \leq 1$ м/с (в качестве примера: для втулок из древесно-слоистых пластиков $P \leq 35$ МПа и $v \leq 8$ м/с).

Примечательной при этом оказывается влагопоглощающая способность древесины, позволяющая реализовать эффект самосмазывания (в условиях затрудненной маслоподачи, а также при нагрузках, требующих применения твердых смазочных материалов), что находит подтверждение также в работах [2, 13–16, 18, 19]. Анатомические составляющие древесины (клетки, поры, сосуды) и их микроструктура выступают в роли коллекторов смазочной среды. Влага (в данном случае масло) при определенной технологической подготовке [17] заполняет поры клеток и увлажняет их стенки с интенсивностью, зависящей от направления волокон, породы древесины, положения в стволе (ядро, заболонь).

Принимая во внимание, что сосуды в древесине составляют от 10 % (береза) и до 56 % (липа) общего ее объема; волокна либриформа – от 36 % (липа) до 75 % (береза) объема; у дуба длина сосудов 3,6 м, диаметр 0,03...0,5 мм, а объем сосудов от 7 до 43 % (для крупнослойной древесины дуба от 6 до 10 %, для мелкослойной (заболонной) – до 40 % общего объема), можно ожидать, что древесина обладает весьма высоким потенциалом в реализации эффекта самосмазывания. При этом ее заготовка для подшипниковых вкладышей должна проводиться с учетом особенностей формирования анатомических составляющих в вегетативный и поствегетативный периоды.

В процессе передачи усилия со стороны вала подшипника вследствие упругой деформации древесины маслоподача на поверхность трения происходит за счет капиллярного смачивания прозенхимных лигнифицированных волокон либриформа, выполняющего механическую функцию, «желатинозных» нелигнифицированных клеток и сосудов, выполняющих влагопроводящую функцию, со стороны технологического масляного канала. При возникновении максимального давления в центре дуги контакта при нагружении вкладыша со стороны вала в пределах угла охвата создается область сжимающих напряжений, а в горизонтальной плоскости – растягивающих, в которой капилляры либриформа, находящиеся в зоне, например, предварительно созданных (технологических) напряжений сжатия, восстанавливают первоначальную (естественную) форму, чем создают предпосылки для облегчения маслоподачи.

В условиях жидкостного трения сочетание в контактной зоне подшипника абразивной составляющей, масла, продуктов износа древесины и металлического вала и образующихся в результате химических процессов третичных фаз приводит к образованию на поверхности втулки и вала особых конверсионных структур, состав которых является отличным от структур материалов принятой пары трения. Это существенно изменяет закономерности изнашивания и оказывает влияние на ресурс подшипника.

Наблюдается способность древесины удерживать в структуре продукты изнашивания, повышая их концентрацию на поверхностях трения и образуемая при этом химически стабильные структуры в результате реакций с модификаторами смазки. Отмеченное приводит к достижению критического уров-

ня температуры, обуславливающего на изначально заданных режимах работы схватывание поверхностей, в особенности в диапазоне удельных давлений граничного трения, и в связи с этим требует уточнения проектных значений скорости и давления.

В результате проведения РСА идентифицировались состав и концентрации элементов на поверхностях трения образцов втулок подшипников в начальном состоянии, а также в процессе проведения триботехнических испытаний на изнашивание в условиях граничного и жидкостного трения, в том числе с присутствием абразива.

При модифицировании древесины дуба в электролите на основе цианидов отмечается несколько пониженная концентрация меди (63,2 %), по сравнению с кремнефтористым электролитом, а также некоторый прирост содержания железа (5,32 %).

Из полученных данных видно, что элементный состав образцов в области поверхности трения характеризуется содержанием железа, меди, кремния и цинка. Причем, сравнивая результаты РСА до и после испытаний втулок, установлено повышенное содержание железа в структуре материала образцов, что, по-видимому, связано с насыщением поверхностного слоя древесины продуктами износа при контакте со стальным валом.

Для всех модифицированных состояний образцов древесины, прошедших испытания, установлено существенное снижение концентрации никеля, калия, кальция, хрома и свинца. Можно предположить, что при повышенных температурах и давлениях в контактной зоне инициируются процессы взаимодействия атомов указанных элементов с молекулами смазки, в результате чего образуются третичные соединения, формирующие конверсионные пленочные слои.

На стадии испытаний, предшествующей потере подшипниками работоспособности, прослеживается разрушение структуры поверхностных слоев, принимающее характер близкий к усталостному. Образующиеся на поверхности микротрещины способствуют отделению некоторых объемов материала, химический состав которого представлен продуктами реакций смазки с кислотами, продуктами изнашивания и элементами, входящими в состав древесины. Обладая повышенной твердостью и оставаясь на поверхностях контакта, они инициируют процессы разрушения, характеризующиеся резко возрастающей интенсивностью развития.

Выводы

1. Разработана новая конструкция подшипника скольжения, имеющая форму втулки, из модифицированной электролитической медью древесины, отличающаяся технологически формируемым уровнем напряжения сжатия. Такой подшипник обладает повышенными триботехническими параметрами: износостойкостью, теплостойкостью, низким коэффициентом трения.

2. Экспериментально установлено, что в условиях жидкостного трения в результате химических процессов на поверхностях втулки из модифицированной древесины и стального вала происходит образование особых конверсионных структур, содержащих железо, медь, кремний и цинк. Это существенно изменяет закономерности изнашивания и способствует повышению работоспособности подшипника.

3. Стабильная работа подшипника из модифицированной древесины обеспечивается при удельной нагрузке $P = 10$ МПа и окружной скорости вала $v \leq 1$ м/с в присутствии жидкостной смазки. В условиях граничного трения температура резко возрастает, что может привести к схватыванию поверхностей и выходу из строя узла трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аксенов А.А., Малюков С.В. Исследования зависимости триботехнических свойств сильно нагруженных подшипников из модифицированной древесины // Лесотехн. журн. 2016. № 1. С. 168–184. [Aksenov A.A., Malyukov S.V. Research of Dependence of Tribological Properties of Highly Loaded Bearings Made of Modified Wood. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2016, no. 1, pp. 168–184]. DOI: [10.12737/18740](https://doi.org/10.12737/18740)

2. Буренин В.В. Самосмазывающиеся подшипники скольжения // Приводная техника. 2002. № 6. С. 45–56. [Burenin V.V. Self-Lubricating Plain Bearings. *Privodnaya tekhnika*, 2002, no. 6, pp. 45–56].

3. Геккер Ф.Р. Динамическая модель узлов трения, работающих без смазочных материалов // Трение и износ. 1993. № 6. С. 1051–1058. [Gekker F.R. Generalized Dynamic Model of ‘Dry’ Friction Units. *Treniye i iznos* [Journal of Friction and Wear], 1993, no. 6, pp. 1051–1058].

4. Купчинов Б.И., Белый В.А., Нешин А.И. Антифрикционный самосмазывающийся материал повышенной теплостойкости на основе древесины // Фрикционные и антифрикционные пластмассы. М.: МЛНТП, 1975. С. 62–66. [Kupchinov B.I., Belyu V.A., Neshin A.I. Antifriction Self-Lubricating Material of Increased Heat Resistance Based on Wood. *Friction and Antifriction Plastic Materials*. Moscow, MLNTP Publ., 1975, pp. 62–66].

5. Памфилов Е.А., Симин А.П., Шевелева Е.В. Исследование древесно-металлических композиционных материалов на основе модифицированной древесины // Деревообаб. пром-сть. 2004. № 1. С. 12–15. [Pamfilov E.A., Simin A.P., Sheveleva E.V. The Study of Wood-Metal Composite Materials Based on Modified Wood. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*, 2004, no. 1, pp. 12–15].

6. Патент № 2539022 Российская Федерация, МПК F16C 17/12, F16C 33/12, F16C 33/18. Подшипник скольжения и способ изготовления: № 2013131631/11: заявл. 09.07.2013; опубл. 10.01.2015 / Шамаев В.А., Медведев И.Н., Галаворян Р.А., Манаев В.А. [Shamaev V.A., Medvedev I.N., Galavorgjan R.A., Manaev V.A. *Plain Bearing and Method of Its Manufacture*. Patent RF no. RU 2539022 C1, 2015].

7. Прокофьев Г.Ф., Дундин Н.И., Иванкин И.И., Банников А.А. Применение аэростатических опор при совершенствовании ленточнопильных станков для продольной распиловки древесины // Вестн. машиностроения. 2004. № 8. С. 9–12. [Prokofiev G.F., Dundin N.I., Ivankin I.I., Bannikov A.A. The Use of Aerostatic Bearings in the Improvement of Bandsaw Machines for Longitudinal Sawing of Wood. *Vestnik mashinostroyeniya* [Russian Engineering Research], 2004, no. 8, pp. 9–12].

8. Симин А.П. Повышение долговечности вкладышей подшипников скольжения, изготавливаемых из композиционных материалов на основе растительных полимеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2003. 20 с. [Simin A.P. *Increasing the Durability of Plain Bearing Liners Made of Composite Materials Based on Plant Polymers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Bryansk, 2003. 20 p.].

9. Смольяков И.А., Ясенов В.В., Белокуров В.П. Износостойкость антифрикционных материалов на основе модифицированной древесины // Технология и оборудование деревообработки в XXI веке: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2003. С. 158–160. [Smolyakov I.A., Yasenov V.V., Belokurov V.P. Wear Resistance of Antifriction Materials Based on Modified Wood. *Technology and Equipment for Woodworking in*

the 21st Century: Inter-University Collection of Academic Papers. Voronezh, VGLTA Publ., 2003, pp. 158–160].

10. Хухрянский П.Н. Прессование древесины. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-ть, 1964. 351 с. [Khukhryanskiy P.N. *Pressing of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 351 p].

11. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины: монография. М.: ФЛИНТА, 2013. 448 с. [Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Wood Modification: Monograph*. Moscow, FLINTA Publ., 2013. 448 p.].

12. Bos J., Moes H. Frictional Heating of Tribological Contacts. *Journal of Tribology*, 1995, vol. 117, iss. 1, pp. 171–177. DOI: [10.1115/1.2830596](https://doi.org/10.1115/1.2830596)

13. Bowden F.P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford, Clarendon Press, 1986. 374 p.

14. Kennedy F.E. Thermal and Thermomechanical Effects in Dry Sliding. *Wear*, 1984, vol. 100, iss. 1-3, pp. 453–476. DOI: [10.1016/0043-1648\(84\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90026-7)

15. Komanduri R., Hou Z.B. Analysis of Heat Partition and Temperature Distribution in Sliding Systems. *Wear*, 2001, vol. 251, iss. 1-12, pp. 925–938. DOI: [10.1016/S0043-1648\(01\)00707-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00707-4)

16. Komanduri R., Hou Z.B. Thermal Analysis of Dry Sleeve Bearings – A Comparison between Analytical, Numerical (Finite Element) and Experimental Results. *Tribology International*, 2001, vol. 34, iss. 3, pp. 145–160. DOI: [10.1016/S0301-679X\(00\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00144-4)

17. Szeri A.Z. *Fluid Film Lubrication*. Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 547 p.

18. Tian X., Kennedy F.E. Contact Surface Temperature Models for Finite Bodies in Dry and Boundary Lubricated Sliding. *Journal of Tribology*, 1993, vol. 115, iss. 3, pp. 411–418. DOI: [10.1115/1.2921652](https://doi.org/10.1115/1.2921652)

19. Tian X., Kennedy F.E. Maximum and Average Flash Temperatures in Sliding Contact. *Journal of Tribology*, 1994, vol. 116, iss. 1, pp. 167–174. DOI: [10.1115/1.2927035](https://doi.org/10.1115/1.2927035)

MODIFYING WOOD FOR CREATION PLAIN BEARINGS OF TIMBER MACHINES

G.A. Pilyushina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>

P.G. Pyrikov, Doctor of Engineering, Prof.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-7458>

E.A. Pamfilov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>

A.Ya. Danilyuk, Postgraduate Student

V.V. Kapustin, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>

Bryansk State Technical University, b-r 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation; e-mail: rector@tu-bryansk.ru, pyrikovpg@mail.ru

The use of modified wood in different friction pairs of timber machines and processing equipment is largely due to its high wear resistance, low coefficient of friction and good dissipative characteristics. The positive properties of composite materials are achieved by using technologies of volumetric modification and implantation of antifriction and heat-conducting elements, as well as by forming a composite of crushed wood with the addition of modifying additives and three-dimensional reinforcement. The expansion of the scope of using composite materials in the designs of units with sliding friction pairs necessitates carrying out research on their performance and formation conditions for high level tribotechnical parameters: wear resistance, antifriction, heat resistance, etc. Lack of information on the effect from the factors providing the functional characteristics of wood-based materials,

including thermal conductivity and vibration absorption significantly complicates the problem analysis in design and technology when developing and producing bearing joints. Therefore, the purpose of this work was studying the conditions of contact interaction of plain bearings made of wood-metal composite materials, allowing for rheological effects, and developing the ways of control their tribotechnical parameters by changing the structure, composition and phase filler. Models of bearings of different types, which allow creating a regulated stress-strain state in sleeves and liners, were developed for these purposes. Research of the bearings performance made it possible to find vibration-damping properties when using suspended crushed fractions in the composite. Increased antifriction properties are achieved in the process of wood modification with electrolytic copper, while the manufacturability of a bearing sleeve is achieved when the support is formed directly at the installation site. Unlike most of the used antifriction materials, the bushings wood maintains the stability of structure in conditions of volumetric compression at negative and positive temperatures, and the wear processes occurring on the contact surfaces of wood-metal bearings are followed by the compaction of the sleeve material. The subsequent destruction is predominantly of fatigue nature, initiated by the dynamics of vibrations and disturbances of the system; therefore, an important part of further research is the assessment of the relaxation ability of wood-metal composites under shock-vibration loading with optimization of their composition according to this criterion.

For citation: Pilyushina G.A., Pyrikov P.G., Pamfilov E.A., Danilyuk A.Ya., Kapustin V.V., Modifying Wood for Creation Plain Bearings of Timber Machines. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 155–165. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-155-165

Funding: The research is carried out under the project “Research and Creation of Plain Bearings of Increased Wear Resistance Based on Wood-Metal Composite Materials” within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 9.10677.2018/11.12).

Keywords: tribotechnical parameters, wood-based materials, electrolytic coppering, wear resistance, thermal conductivity, stress state.

Поступила 20.09.19 / Received on September 20, 2019

УДК 674.023

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-166-175

ОБОСНОВАНИЕ ОВАЛЬНОСТИ ФОРМЫ СЕЧЕНИЙ СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ ПРИ ИХ РОСТЕ С НАКЛОНОМ

В.Н. Глухих, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAV-9066-2020](https://orcid.org/0000-0002-9912-506X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9912-506X>

А.Г. Черных, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAV-4843-2020](https://orcid.org/0000-0001-9805-1428)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9805-1428>

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005;

e-mail: vnglukhikh@mail.ru, ag1825831@mail.ru

Известно, что по некоторым внешним признакам можно определить возраст дерева и условия его произрастания. К этим признакам относятся количество годичных слоев на поперечном срезе ствола дерева, правильность геометрической формы этих слоев. Сбег ствола свидетельствует о том, где выросло это дерево: в загущенном древостое или на открытой местности. Овальная форма сечений ствола свойственна деревьям с несимметричной кроной либо выросшим под наклоном к горизонту. На форму сечений стволов деревьев оказывает влияние мощное внешнее воздействие в виде господствующей ветровой нагрузки. В ответ на внешние воздействия в процессе роста дерева формируется его ствол, крона и соответствующая этому влиянию прочность при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон древесины. Результатом взаимодействия этих факторов являются размеры, форма и местоположение ядровой и заболонной зон в стволах деревьев, от которых зависят прочность, плотность, расположение дефектов древесины, что отражается на качестве изделий из нее и процессе их эксплуатации. Единым критерием оценки влияния природных особенностей древесины на качество и прочность деревянных строительных конструкций авторами выбрано формирующееся в процессе роста деревьев начальное напряжение, величина которого может быть объективно оценена по размерам и форме ядровой и заболонной зон сечений стволов. Размеры и форма этих зон могут быть измерены путем сканирования. Схема распиловки бревен должна выбираться с использованием соответствующих компьютерных программ, которые позволяют получать высококачественные пиломатериалы конструкционного назначения. Цель исследования – обосновать связь формы и размеров овальных сечений стволов деревьев с развивающимися в процессе роста начальными напряжениями и прочностью древесины при растяжении, сжатии вдоль волокон и статическом изгибе.

Для цитирования: Глухих В.Н., Черных А.Г. Обоснование овальности формы сечений стволов деревьев при их росте с наклоном // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 166–175. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-166-175

Ключевые слова: предел прочности древесины, статистический изгиб, изгибающий момент, деревянные конструкции, напряженно-деформированное состояние, начальное напряжение, смещение центра ядра.

Введение

Как уже отмечалось в известных работах отечественных [1, 2–5, 7–10] и зарубежных [17–19, 21] исследователей, формирование ствола дерева проис-

ходит в ответ на внешние влияния. Под действием веса ствола и кроны, атмосферных осадков и критической ветровой нагрузки формируется наиболее прочная несущая часть ствола [6, 11–13, 15, 20]. Известно, что при произрастании дерева в загущенном древостое сечения стволов близки к правильному кругу и ствол является прямым стержнем равного сопротивления, у которого заболонная часть сечения представляет собой кольцо, а ядровая очерчена окружностью. В таких случаях начальные напряжения распределены в объеме ствола по закону параболоида соответствующей степени и соотношение между пределами прочности при статистическом изгибе и сжатии вдоль волокон несложно описать математически. Это позволяет исследовать распределение начальных напряжений и деформаций изгиба пиломатериалов при раскросе пиловочника и решать ряд задач, имеющих практическое значение.

Однако остается немало вопросов, требующих ответа. Пиловочник на практике часто представляет собой искривленные бревна, в значительных пределах изменяется их сбеги, размеры ядровой и заболонной зон. Часто центр ядровой зоны смещен относительно геометрического центра сечений, и они имеют овальную форму. Остается неизвестным, как влияет формирующаяся в процессе роста дерева овальность его сечений на прочность древесины при статистическом изгибе и сжатии вдоль волокон, на продольную покоробленность пиломатериалов при раскросе пиловочника и сушке, в каких случаях в стволах деревьев начинается формирование креновой древесины, как распределены начальные напряжения в стволах деревьев с естественной кривизной или произрастающих с наклоном к горизонту, каков механизм возврата наклоненного в процессе роста ствола дерева в вертикальное положение. Эти и другие вопросы имеют научный и практический интерес, а ответ на них кроется в объяснении формирования стволов деревьев с позиций основных принципов бионики как стержней равного сопротивления [9, 10].

Цель исследования – обосновать связь формы и размеров овальных сечений стволов деревьев с развивающимися в процессе роста начальными напряжениями и прочностью древесины при растяжении, сжатии вдоль волокон и статическом изгибе.

Объекты и методы исследования

В известной работе немецкого ученого Н. Kübler [17] суммарное напряжение не только значительно превышает начальное напряжение, но и отрицательно в одной из частей сечения ствола. Поэтому такое сечение имеет форму овала при наличии эксцентриситета ядровой зоны. Это подтверждает наше предположение о взаимосвязи расположения ядровой зоны с распределением начальных напряжений в сечениях стволов деревьев.

В соответствии с разработанной нами [2] методикой можно вычислить экстремальное напряжение в сжатой части сечения и найти соотношение пределов прочности древесины при статистическом изгибе и сжатии вдоль волокон.

Если дерево произрастает в загущенном древостое и защищено от критического ветрового напора кронами соседних деревьев, то его ствол формируется прямым и круглым с небольшим сбегом. Центр ядровой зоны чаще всего совпадает с геометрическим центром сечения ствола. В работе [5] приведена методика определения относительного размера ядровой зоны и закона распределения начальных напряжений по объему ствола.

В прямом стволе дерева начальные напряжения возникают от действия физико-химического фактора [2, 7, 14, 16] и будут распределены по закону параболоида соответствующей степени в зависимости от размеров ядровой зоны. Задача является осесимметричной (рис. 1).

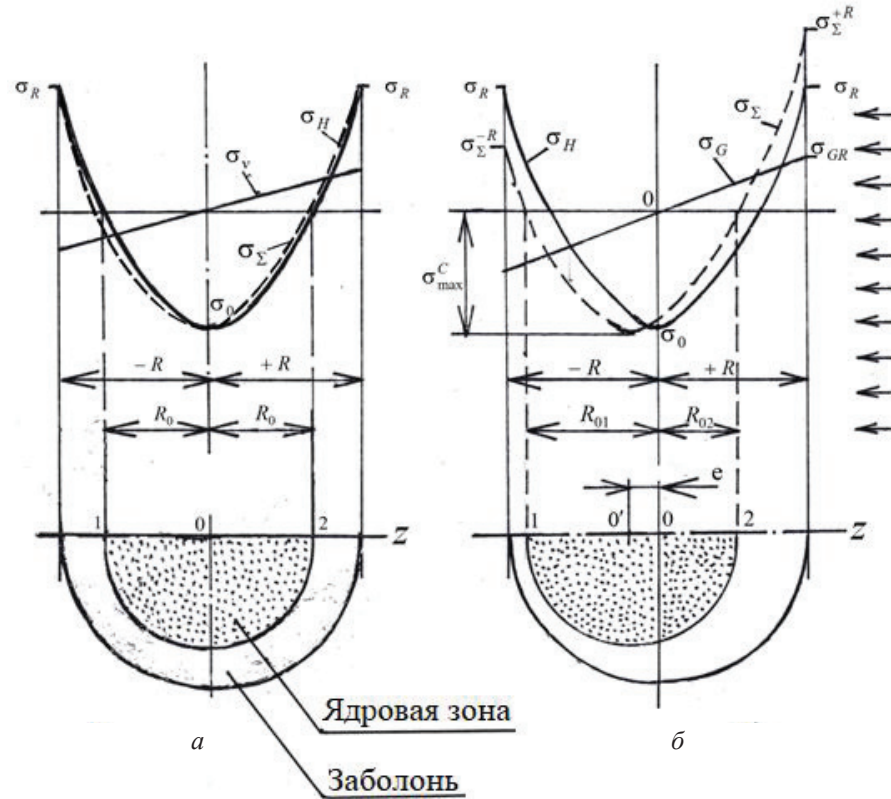


Рис. 1. Положение ядровой зоны в прямостоящем (а) и наклонно растущем (б) дереве: $-R, +R$ – радиус сечения ствола дерева с подветренной и наветренной сторон; σ_R – напряжение на поверхности ствола; σ_H – начальное напряжение в волокнах дерева; R_0 – радиус ядровой зоны; R_{01} и R_{02} – радиусы в крайних точках ядровой зоны в плоскости действия господствующей ветровой нагрузки; σ_G – напряжение изгиба; σ_{\max}^C – максимальное сжимающее напряжение в сечении ствола, вызванное ветровой нагрузкой и массой ствола дерева; σ_v – напряжение в сечении ствола при изгибе дерева от ветровой нагрузки; σ_Σ – суммарное напряжение от ветровой нагрузки; $\sigma_\Sigma^{-R}, \sigma_\Sigma^{+R}$ – напряжение от ветровой нагрузки с подветренной и наветренной сторон; e – эксцентриситет

Fig. 1. The position of the core zone in the upright (а) and inclined (б) tree: $-R, +R$ – radius of the tree trunk section from the leeward and windward sides; σ_R – trunk surface stress; σ_H – initial stress in wood fibers; R_0 – radius of the core zone; R_{01} and R_{02} – radii at the extreme points of the core zone in the plane of the prevailing wind load; σ_G – bending stress; σ_{\max}^C – maximum compression in the trunk section caused by wind load and tree trunk weight; σ_v – stress in the trunk section under bending by wind load; σ_Σ – total stress from wind load; $\sigma_\Sigma^{-R}, \sigma_\Sigma^{+R}$ – wind stress on the leeward side and the windward side; e – eccentricity

При распределении, например, по закону параболоида второй степени (рис. 1, а) функция начальных напряжений имеет следующий вид:

$$\sigma_H = k_2 r^2 - \sigma_0, \quad (1)$$

где σ_0 – начальное напряжение в центре сечения ствола; $k_2 = \frac{2\sigma_0}{R^2}$, [2]; $r^2 = z^2 + y^2$; r, z, y – координаты по соответствующим осям.

В наклонно растущем дереве (рис. 1, б) к начальным напряжениям в осесимметричной задаче (1) добавится постоянная составляющая напряжения при изгибе ствола от его собственной массы с учетом массы кроны и атмосферных осадков:

$$\sigma_H = k_2 r^2 + \frac{\sigma_{GR}}{R} z - \sigma_0, \quad (2)$$

где σ_{GR} – максимальное напряжение изгиба в плоскости наклона ствола.

В обоих случаях суммарное напряжение σ_Σ на поверхности сжатой зоны остается растягивающим.

Размеры ядровой зоны в обоих примерах можно найти из уравнений (1) и (2):

в осесимметричной задаче

$$R_{01} = -0,707R; R_{02} = 0,707R [2],$$

где R – радиус сечения ствола дерева;

при наклоне дерева функцию суммарного напряжения приравняем к 0:

$$k_2 R_0^2 + \frac{\sigma_{GR}}{R} R_0 - \sigma_0 = 0, \quad (3)$$

где R_0 – радиус ядровой зоны.

Отсюда получим:

$$R_{01} = \frac{R}{4} \left[-\frac{\sigma_{GR}}{\sigma_0} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{GR}}{\sigma_0}\right)^2 + 8} \right]; \quad (4)$$

$$R_{02} = \frac{R}{4} \left[-\frac{\sigma_{GR}}{\sigma_0} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{GR}}{\sigma_0}\right)^2 + 8} \right]. \quad (5)$$

В рассмотренных случаях в части сечения ствола с подветренной стороны (рис. 1) начальные напряжения с учетом напряжения изгиба от собственного веса не переходят нулевого значения и остаются растягивающими. Сечение ствола формируется близким к круглому.

Практически то же самое происходит в растущем наклонном дереве, если в плоскости его наклона действует господствующая ветровая нагрузка (σ_0 – напряжение изгиба от ветровой нагрузки).

Если суммарное напряжение σ_Σ в зоне сжатия от действия ветровой нагрузки (рис. 2, а) переходит нулевую отметку и становится сжимающим, то начинает формироваться овальность сечения, за счет появления которой в периферийных точках сечения с подветренной стороны (рис. 2, б) напряжения сжатия уменьшаются до тех пор, пока суммарное напряжение вновь не станет растягивающим.

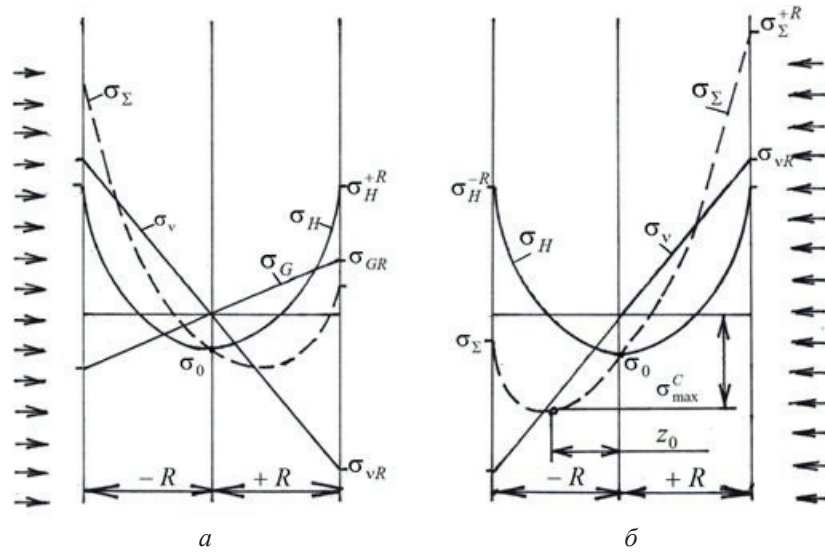


Рис. 2. Распределение начальных и суммарных напряжений в случаях одинакового (а) и неодинакового (б) направления господствующего ветра и наклона ствола дерева: z_0 – координата точки с максимальным сжимающим напряжением; σ_{vR} – напряжение в поверхностном слое ствола дерева при изгибе ветровой нагрузкой

Fig. 2. Distribution of initial and total stresses in cases of the same (а) and different (б) direction of the prevailing wind and inclination of the tree trunk; z_0 – coordinate of the point with the maximum compression; σ_{vR} – stress in the surface layer of the tree trunk under bending by wind load

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице приведены расчетные значения радиусов ядровой зоны в плоскости наклона ствола дерева при разных соотношениях $\frac{\sigma_{GR}}{\sigma_0}$, подтверждающие факт смещения центра ядровой зоны по отношению к геометрическому центру сечений ствола.

С увеличением наклона ствола ядровая зона смещается от геометрического центра сечения в сторону зоны сжатия. Для ветвей дерева, растущих перпендикулярно оси ствола, характерно отношение

$$\frac{\sigma_{GR}}{\sigma_0} = 1.$$

Если это отношение больше 1, тогда ветви будут иметь наклон вниз, содержание креновой древесины и овальную форму сечения.

Как видно из данных таблицы, с увеличением наклона ствола к горизонту предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон несколько возрастает по отношению к пределу прочности при статистическом изгибе. По разработанной нами методике [5] можно вычислить начальные напряжения в любой точке объема ствола при других законах их распределения, изгибающие моменты по кромке и пласти выпиливаемых из ствола пиломатериалов, а также их продольную покоробленность, появляющуюся при распиловке и последующей сушке.

**Радиусы ядровой зоны при различных соотношениях начальных напряжений
и напряжений изгиба при наклоне дерева**

Параметр	Отношение напряжения изгиба к начальному напряжению $\frac{\sigma_{GR}}{\sigma_0}$							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
Радиус ядровой зоны: R_{01} R_{02}	0,733R 0,6825R	-0,758R 0,659R	-0,786R 0,636R	-0,814R 0,614R	-0,873R 0,573R	-0,935R 0,535R	-0,967R 0,517R	-R R/2
Координата экстремальной точки z_0	-0,025R	-0,050R	-0,075R	-0,100R	-0,150R	-0,200R	-0,225R	-0,250R
Отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон	1,9975	1,9900	1,9770	1,9610	1,9139	1,8520	1,8160	1,7780

Возможен случай, когда суммарное напряжение в периферийной зоне сечения с подветренной стороны наклоненных и искривленных стволов становится постоянно сжимающим. Для сохранения жизнестойкости ствола происходит перераспределение поступления питательных веществ таким образом, чтобы периферийные (заболонная зона) части сечения испытывали растяжение в продольном направлении. В этих частях сечения увеличивается ширина годичных слоев за счет изменения толщины стенок клеток, и сечение постепенно становится овальным, так как в плоскости под углом 90° к рассматриваемой плоскости такого усиления не происходит.

Таким образом, при некоторых соотношениях полуосей эллипса напряжения в т. 1 и т. 1' (рис. 3) должны быть равными друг другу, т. е. при прочих равных условиях будут равны друг другу и осевые моменты сопротивления круга и эллипса.

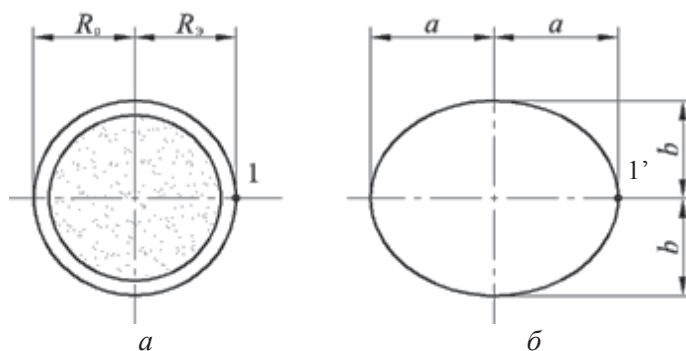


Рис. 3. Формы сечений ствола дерева при равновеликих суммарных напряжениях в точках 1 и 1' на контуре при кратковременных (а) и длительных (б) нагрузках (при раскачивании дерева от порывов ветра)

Fig. 3. Shapes of sections of a tree trunk with equal total stresses at points 1 and 1' on the contour under temporary (a) and constant (b) loads (when a tree sways under the gusts of wind)

Из этого следует, что

$$R_3^3 = a^2 b, \quad (6)$$

где R_3^3 – радиус эквивалентного сечения; a, b – длины полуосей ствола.

Если рассматривается прямостоящий ствол дерева с симметричной кроной, то $b = R_3$, $a = \sqrt{\frac{R_3^3}{b}} = R_3$, т. е. полуоси будут одинаковыми, а при отсутствии внешнего несимметричного воздействия сечение ствола будет правильным кругом.

Если известно соотношение полуосей эллипса, имеем:

$$R_3 = \sqrt[3]{a^2 b}. \quad (7)$$

По найденному радиусу круга можно установить вид функции начального напряжения и исследовать величины изгибающих моментов и прогибов пиломатериалов от действия начальных напряжений, возникших в стволе дерева в процессе его роста.

При этом, зная предел прочности при сжатии вдоль волокон σ_{BC} , можно численно решить задачу по определению эксцентриситета ядровой зоны и начальных напряжений в древесине либо обратную задачу.

Такая задача решена нами впервые и может быть реализована при разработке компьютерных технологий раскря пиловочника из любых пород древесины в целях получения высококачественных пиломатериалов для изготовления деревянных строительных конструкций. Отношение максимальных напряжений в двух задачах (с эллипсом и кругом) должно быть равно 1, т. е. $\frac{4M_2}{\pi a^2 b} / \frac{4M_1}{\pi R^3} = 1$ или $nR_3^3 = a^2 b$, где $n = M_2/M_1$ (где M_1 и M_2 – изгибающие моменты от ветровой нагрузки в точках 1 и 1' (рис. 3)).

Задавая различные отношения n , можно вычислить размеры полуосей эллипсовидного сечения a и b (рис. 4):

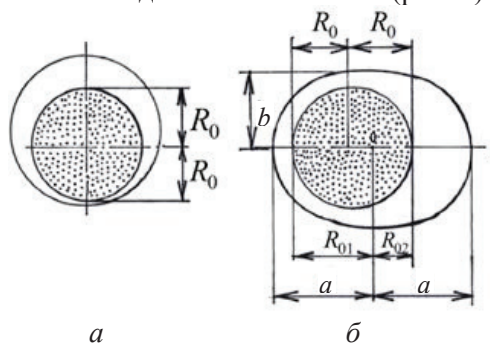


Рис. 4. Форма сечений ветвей дерева и его ствола: a – исходная; b – при наклоне с распределением начальных напряжений по параболоиду второй степени

Fig. 4. Shape of sections of the branches of a tree and its trunk: a – initial; b – when inclined with the distribution of the initial stresses over a paraboloid of the 2nd degree

$$n = 1; a = b = R_3;$$

$$n = 2; b = R_3; a = R\sqrt{2};$$

$$n = 1,5; b = R_3; a = \sqrt{1,5}R = 1,225R.$$

С другой стороны, при сканировании торцевого сечения бревна можно определить эксцентриситет ядровой зоны, соотношение напряжений в крайних наиболее напряженных точках сечения, закон изменения начальных напряжений и исследовать формоустойчивость и прочность выпиленных пиломатериалов при статистическом изгибе и сжатии вдоль волокон.

Появляющаяся при наклоне либо естественной кривизне ствола несимметричность суммарного напряжения способствует выпрямлению ствола и возврату его в вертикальное положение в процессе роста (см. рис. 1, 2). Этому постепенному процессу «помогает» появление овальности сечений ствола до тех пор, пока суммарное напряжение при раскачивании дерева от ветровой нагрузки не примет осесимметричную схему.

Если вокруг дерева, выросшего в густом древостое, убрать соседние деревья, то ствол такого дерева будет не готов к тому, чтобы сопротивляться изменившимся внешним воздействиям. Экстремальное напряжение сжатия несколько увеличится по отношению к напряжению растяжения (см. табл. 1). При очередном внешнем воздействии верхняя часть ствола с кроной приобретет необратимую деформацию изгиба за счет появления складок смятия в сжатой зоне, что проиллюстрировано в работе [1].

Выводы

1. Впервые предложена методика определения полуосей овального сечения ствола дерева при его росте с наклоном.

2. Результаты теоретических исследований не противоречат опытным наблюдениям, а лишь подтверждают предположение о том, что в стволе дерева в процессе роста развиваются начальные напряжения, являющиеся главной причиной образования овальности сечений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белов С.В. Ветер – главный фактор, определяющий форму стволов деревьев и их устойчивость // Ботан. журн. СССР. 1934. Т. 13, № 3. С. 3–24. [Belov S.V. Wind is the Main Factor Determining the Shape of Tree Trunks and Their Stability. *Botanicheskii Zhurnal*, 1934, vol. 13, no. 3, pp. 3–24].

2. Глухих В.Н., Акоюн А.Л. Начальные напряжения в древесине: моногр. СПб.: СПбГАСУ, 2016. 118 с. [Glukhikh V.N., Akopyan A.L. *Initial Stresses in Timber*: Monograph. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2016. 118 p.].

3. Глухих В.Н., Охлопкова А.Ю. Формирование кармашков в стволах деревьев лиственницы даурской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 5. С. 35–52. [Glukhikh V.N., Okhlopko A.Yu. Resin Pocket Formation in Tree Stems of Dahurian Larch. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 5, pp. 35–52]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.5.35](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.5.35), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/212/Glukhikh2.pdf>

4. Глухих В.Н., Охлопкова А.Ю. Определение изгибающего момента и прогиба в сечениях пиломатериалов лиственницы даурской от действия начальных напряжений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 1. С. 89–98. [Glukhikh V.N., Okhlopko A.Yu. Determination of Bending Moment and Deflection in Lumber Cross-Sections of Dahurian Larch from the Action of Initial Stresses. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 1, pp. 89–98]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.1.89](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.89), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/051/89_98.pdf

5. Глухих В.Н., Акоюн А.Л., Охлопкова А.Ю. Природные особенности древесины: моногр. СПб.: Политех, 2018. 392 с. [Glukhikh V.N., Akopyan A.L., Okhlopko A.Yu. *Natural Features of Wood*: Monograph. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2018. 392 p.].

6. Иванов Л.А. О влиянии ветра на рост дерева // Ботан. журн. СССР. 1934. Т. 13, № 3. С. 37–44. [Ivanov L.A. On the Effect of Wind on Tree Growth. *Botanicheskii Zhurnal*, 1934, vol. 13, no. 3, pp. 37–44].

7. Кузнецов А.И. Внутренние напряжения в древесине. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. 59 с. [Kuznetsov A.I. *Internal Stresses in Timber*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1950. 59 p.].

8. Охлопкова А.Ю. Исследование покоробленности пиломатериалов лиственницы даурской от действия начальных напряжений и собственного веса // Системы. Методы. Технология. 2018. № 1. С. 17–21. [Okhlopkova A.Yu. Research of Dahurian Larch Sawmill Warping Caused by of Initial Stresses and its Own Weight. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods. Technologies.], 2018, no. 1, pp. 17–21]. DOI: [10.18324/2077-5415-2018-1-105-109](https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-1-105-109)

9. Раздорский В.Ф. Принципы строения скелета растений // Природа. 1934. № 9. С. 20–29. [Razdorskiy V.F. Principles of the Skeleton Structure of Plants. *Priroda*, 1934, no. 9, pp. 20–29].

10. Темнов В.Г. Бионический принцип регулирования параметров напряженно-деформированного состояния конструктивных систем при их проектировании и эксплуатации // Материалы 53-й науч. конф. СПб.: СПбГАСУ, 1996. С. 123–128. [Temnov V.G. The Boinic Principle of Regulating the Parameters of the Stress Strain Behavior of Structural Systems during Their Design and Operation. *Proceedings of the 53rd Scientific Conference*. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 1996, pp. 123–128].

11. Alméras T., Clair B. Critical Review on the Mechanisms of Maturation Stress Generation in Trees. *Journal of The Royal Society Interface*, 2016, vol. 13, iss. 122, art. 20160550. DOI: [10.1098/rsif.2016.0550](https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0550)

12. Banks C.H. Sawing and Stacking. Timber to Reduce Warp. *Timber Technologie*, 1966, no. 3, pp. 36–39.

13. Bonnesoeur V., Constant T., Moulia B., Fournier M. Forest Trees Filter Chronic Wind-Signals to Acclimate to High Winds. *New Phytologist*, 2016, vol. 210, iss. 3, pp. 850–860. DOI: [10.1111/nph.13836](https://doi.org/10.1111/nph.13836)

14. Cassens D.L., Serrano J.R. Growth Stress in Hardwood Timber. *Proceedings of the 14th Central Hardwoods Forest Conference, Wooster, OH, March 16–19, 2004*. Wooster, USDA, 2004, pp. 106–115.

15. Coutand C., Pot G., Badel E. Mechanosensing Is Involved in the Regulation of Autostress Levels in Tension Wood. *Trees*, 2014, vol. 28, pp. 687–697. DOI: [10.1007/s00468-014-0981-6](https://doi.org/10.1007/s00468-014-0981-6)

16. Fourcaud T., Blaise F., Lac P., Castéra P., de Reffye P. Numerical Modelling of Shape Regulation and Growth Stresses in Trees. *Trees*, 2003, vol. 17, pp. 31–39. DOI: [10.1007/s00468-002-0203-5](https://doi.org/10.1007/s00468-002-0203-5)

17. Kübler H. Studien über Wachstumsspannungen des Holzes—Erste Mitteilung: Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung. *Holz als Roh- und Werkstoff* [European Journal of Wood and Wood Products], 1959, vol. 17, pp. 1–9. DOI: [10.1007/BF02608827](https://doi.org/10.1007/BF02608827)

18. Nicholson J.E. A Rapid Method for Estimating Longitudinal Growth Stresses in Logs. *Wood Science and Technology*, 1971, vol. 5, iss. 1, pp. 40–48. DOI: [10.1007/BF00363119](https://doi.org/10.1007/BF00363119)

19. Okura S., Ozawa K., Takagaki N. On the Twisting Warp of Wood. Part IV. Twisting Warp of Boards in Relation to Fiber Directions. *Mokuzai Gakkaishi*, 1963, no. 9(4), pp. 121–124.

20. Roignant J., Badel É., Leblanc-Fournier N., Brunel-Michac N., Ruelle J., Moulia B., Decourteix M. Feeling Stretched or Compressed? The Multiple Mechanosensitive Responses of Wood Formation to Bending. *Annals of Botany*, 2018, vol. 121, iss. 6, pp. 1151–1161. DOI: [10.1093/aob/mcx211](https://doi.org/10.1093/aob/mcx211)

21. Stevens W.C., Mech E. Twist in Sitka Spruce. *Timber Trades Journal*, 1960, no. 2.

REASONING OF TREE CROSS SECTIONS OVAL SHAPING WHILE GROWING WITH AN INCLINATION

V.N. Glukhikh, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAV-9066-2020](https://orcid.org/0000-0002-9912-506X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9912-506X>

A.G. Chernykh, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAV-9066-2020](https://orcid.org/0000-0002-9912-506X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9912-506X>

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation;

e-mail: vnglukhikh@mail.ru, ag1825831@mail.ru

It is known that it is possible to determine the age of a tree and the conditions for its growth by some external features. These features include the number of annual layers on the tree trunk cross section, the correct geometric shape of these layers. The stem taper indicates where this tree grew: in an overstocked stand or in open areas. The oval shape of the cross sections of the trunk is common to the trees with irregular crown or grown inclined to the horizon. A powerful external action of a prevailing wind load influences on the cross sections shaping of tree trunks. Trunk, crown and corresponding cross-breaking strength and compression resistance along the wood fibers of a tree are formed in response to all external influences during its growth. The collaborative effect of these factors is the size, shape and location of the core and sapwood zones in the tree trunks, on which the strength, density, and location of wood defects are dependent, and which affect the quality of wood products in-service. The authors chose the initial stress formed during the tree growth as a uniform criterion for assessing the influence of the natural features of wood on the quality and strength of wooden building structures. The value of which can be fairly estimated by the size and shape of the core and sapwood zones of the tree trunks cross sections. The size and shape of these zones can be measured by scanning. The log sawing pattern should be selected using appropriate computer software that allow obtaining the high-quality sawn timber for the construction purposes. The research purpose is to develop a method for determining the size and shape of the core and sapwood zones of the tree trunk sections that have a natural curvature and grow vertically or with an inclination to the horizon; and what is more, to substantiate the connection between the shape and size of the tree trunk oval sections with the initial stresses developing during growth and the wood strength under tension, compression along the fibers and static bending.

For citation: Glukhikh V.N., Chernykh A.G. Reasoning of Tree Cross Sections Oval Shaping while Growing with an Inclination. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 166–175. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-166-175

Keywords: wood ultimate strength, statistical bending, bending moment, timber structures, stress strain behavior, primary stress, core shifting.

Поступила 11.09.19 / Received on September 11, 2019

УДК 676.1.054.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-176-183

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ В ЦЕЛЯХ РАСШИРЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М.А. Зырянов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

С.О. Медведев, канд. экон. наук; ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

Лесосибирский филиал Сибирского государственного технологического университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: zuryanov13@mail.ru, medvedev_serega@mail.ru

В настоящее время материалы из древесноволокнистых полуфабрикатов нашли широкое применение в домостроении в качестве конструкционных, отделочных и изоляционных. Как показал анализ результатов многочисленных исследований, сырьем для их производства служит технологическая щепка из отходов деревообработки, которая подвергается гидротермической обработке и дальнейшему размолу в дисковых ножевых размалывающих машинах в две ступени. Значительная энергоемкость процесса производства древесного волокна обусловлена не только использованием 2-ступенчатого размола, но и преодолением гидродинамического сопротивления водной среды, где осуществляется размол. В ходе решения задачи расширения сырьевой базы для производства древесноволокнистого полуфабриката и снижения энергоемкости процесса размола был исследован размол щепы из порубочных остатков в аэродинамической среде на модернизированной планко-крестовой мельнице. Проанализированы особенности этого процесса и дана оценка его эффективности. Установлено влияние продолжительности выдержки щепы из порубочных остатков в растворе уксусной кислоты, величины рабочего зазора и угла наклона передней грани ножа на степень помола и фракционный показатель качества помола древесной массы. Получены статистическо-математические уравнения, описывающие исследуемый процесс, и построены графические зависимости, для которых выполняется следующее основное требование: экспериментальные точки в совокупности должны располагаться достаточно близко к кривым. Данные уравнения позволяют прогнозировать качество древесноволокнистой массы в зависимости от установленных режимов процесса размола, а также при известных значениях технологических и конструктивных параметров размалывающей установки определять ее показатели. Подтверждена эффективность процесса получения древесноволокнистого полуфабриката в аэродинамической среде из щепы, произведенной в результате переработки порубочных остатков (ветви, ветки и сучья) в мобильной рубительной машине.

Для цитирования: Зырянов М.А., Медведев С.О. Моделирование процессов получения древесноволокнистых полуфабрикатов в целях расширения сырьевой базы лесопромышленных предприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 176–183. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-176-183

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-1902.2019.6; проект «Разработка и внедрение эффективной технологии комплексной переработки лесосечных отходов» проведен при поддержке Красноярского краевого фонда науки.

Ключевые слова: фибриляция, степень помола, щепка, волокно, порубочные остатки, математическая модель, размол.

Введение

В связи с тем, что потребность в древесном сырье постоянно возрастает, актуальным становится вопрос о комплексном использовании древесины. Удовлетворение потребности деревоперерабатывающих производств в сырье должно осуществляться как за счет экономного, так и наиболее полного использования древесных ресурсов [1, 7–9, 20]. К основным направлениям развития лесного комплекса относят увеличение процента использования всей древесной массы. С этой целью необходимо дальнейшее совершенствование структуры производства лесной и деревообрабатывающей промышленности, технологических процессов производства щепы, древесноволокнистых плит, фанеры, картона и других заменителей пиломатериалов. Одним из приоритетных направлений является производство древесноволокнистого полуфабриката из лесосечных отходов в виде сучьев, ветвей и вершинок. Однако традиционные технологии размола и существующее размалывающее оборудование не позволяют получить древесноволокнистый полуфабрикат из этих отходов с требуемыми качественными характеристиками [2–6].

Объекты и методы исследования

Для расширения сырьевой базы получения древесноволокнистого полуфабриката и повышения эффективности процесса размола отходов растительного происхождения в лаборатории лесоперерабатывающей целлюлозно-бумажной и химической технологии древесины филиала СибГТУ в г. Лесосибирске была разработана конструкция планко-крестовой мельницы, позволяющей осуществлять процесс ножевого размола в аэродинамической среде. На размольную установку получено положительное решение № 2673858 «Устройство для размола щепы в аэродинамической среде».

Размольная камера установки (рис. 1) выполнена из стойких к коррозии и абразивному износу композиционных материалов. Ввиду конструктивных особенностей камеры, отличающих ее от современных дисковых размалывающих машин [10, 14, 16], процесс размола протекает в четырех зонах (I–IV) без присутствия технической воды. В зоне II размол осуществляется в рабочем зазоре между ножами ротора и ножами рифленой планки статора. Происходит интенсивное воздействие на волокнистый полуфабрикат, которое сопровождается раздавливанием, резанием, мятием и трением. В секторе между ножами ротора (зона I) древесноволокнистая масса перемешивается за счет сил трения и центробежной силы, что способствует фибриллированию древесного волокна. В зоне III, расположенной у основания ножа ротора с ножевыми отверстиями, происходит фибриллирование древесного волокна благодаря острым зубьям в ножевых отверстиях, в межножевых ячейках рифленых планок (зона IV) – фибриллирование, выравнивание геометрических размеров волокна и разделение древесноволокнистой массы по фракциям благодаря ножевым отверстиям. Зона IV является завершающей, при этом древесноволокнистый полуфабрикат, имеющий требуемые геометрические размеры, проходит через ножевые отверстия и покидает размольную камеру.

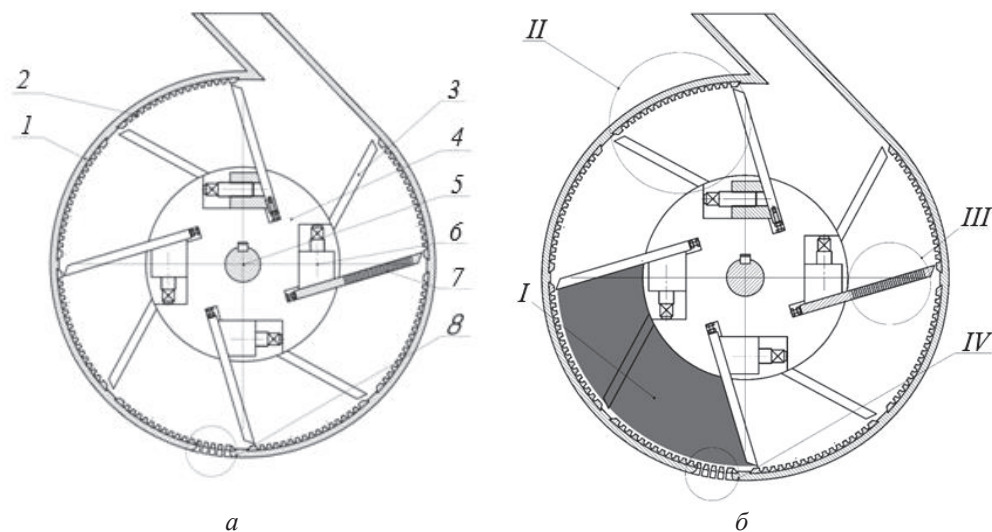


Рис. 1. Размольная камера планко-крестовой мельницы (а) с указанием зон размола (б): 1 – корпус размольной камеры; 2 – рифленая планка статора; 3 – нож ротора; 4 – корпус составной гарнитуры ротора; 5 – вал ротора; 6 – прижимная планка; 7 – ножевые отверстия сепараторов ножей ротора; 8 – ножевые отверстия сепараторов рифленой планки; I–IV – зоны

Fig. 1. Grinding chamber of a cross-bar mill (a) with an indication of grinding zones (b): 1 – grinding chamber body; 2 – stator corrugated bar; 3 – rotor knife; 4 – housing of the composite rotor set; 5 – rotor shaft; 6 – clamping bar; 7 – knife holes of the rotor knife separators; 8 – knife holes of the corrugated bar separators; I–IV – zones

В исследованиях использовалась сосновая щепка, полученная из порубочных остатков в виде ветвей, сучьев и вершин. Длина и толщина щепки варьировались в диапазонах 10...35 мм и 3...5 мм соответственно, угол среза составлял 35...55°, массовая доля коры и гнили не превышала 15 и 5 % соответственно.

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований [11–13, 15, 17–19] повышение реакционной способности древесины и ослабление межволоконных связей достигались не традиционно за счет гидротермической обработки щепки паром, а посредством предварительной обработки щепки 70 %-м водным раствором уксусной кислоты при температуре 55...60 °С.

Основной метод получения статистически-математического описания исследуемого процесса – активный многофакторный эксперимент с использованием В-плана второго порядка [4, 5]. В качестве входных факторов были выбраны: величина рабочего зазора (z), угол наклона передней грани ножа (γ), продолжительность выдержки щепки в водном растворе уксусной кислоты (τ), выходных параметров – основные качественные показатели древесноволокнистой массы: степень помола древесной массы (ДС), фракционный показатель качества помола (Fr).

Выбор основных характеристик моделей, согласно программе экспериментальных исследований, представлен в виде функциональной зависимости

$$\text{ДС, Fr} = f(z, \gamma, \tau). \quad (1)$$

На основании предварительных экспериментов были приняты следующие интервалы варьирования входных параметров: $0,2 \leq z \leq 0,6$ мм; $30^\circ \leq \gamma \leq 50^\circ$; $10 \leq \tau \leq 30$ мин.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате обработки экспериментальных данных с применением современной экспериментальной и лабораторно-измерительной базы на соответствующем уровне метрологического обеспечения исследований получены уравнения, описывающие изменение прироста степени помола и фракционного показателя качества помола от технологических и конструктивных параметров размалывающей машины:

$$\text{ДС} = 21,59 - 0,25\gamma - 2,2z + 1,95\tau + 0,44\gamma z - 0,19z\tau - 0,31\gamma\tau - 0,59\gamma^2 - 0,34z^2 - 0,09\tau^2; \quad (2)$$

$$\text{Fr} = 33,97 + 0,31\gamma - 2,1z + 1,93\tau + 0,34\gamma z - 0,09z\tau - 0,16\gamma\tau - 0,17\gamma^2 - 0,42z^2 + 0,03\tau^2. \quad (3)$$

Расчеты подтвердили, что все коэффициенты регрессионных уравнений значимы. Для наглядности и более полной оценки влияния исследуемых факторов на качественные показатели древесноволокнистого полуфабриката, по уравнениям (2) и (3) построены поверхности отклика, которые демонстрируют их зависимость от конструктивных и технологических параметров планко-крестовой мельницы (рис. 2).

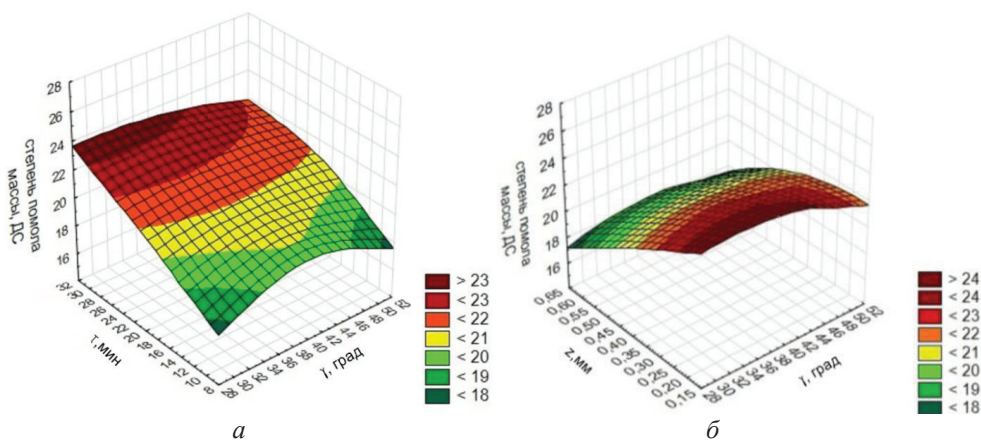


Рис. 2. Зависимость степени помола древесноволокнистой массы (ДС) от продолжительности выдержки (τ) щепы в водном растворе уксусной кислоты и угла наклона (γ) передней грани ножа ротора (*а*) и от величины рабочего зазора (z) и угла наклона (γ) передней грани ножа ротора (*б*)

Fig. 2. Dependence of the grinding degree (ДС) of wood pulp on the time of chips exposure (τ) in an acetic acid aqueous solution, the angle of inclination (γ) of the front face of the rotor knife (*а*) and the size of the working gap (z) and the angle of inclination (γ) of the front edge of the rotor knife (*б*)

Как видно из рис. 2, *а* и уравнения (2), при увеличении времени выдержки щепы в водном растворе уксусной кислоты повышается степень помола массы. Это обусловлено тем, что при более длительной выдержке щепы в водном растворе уксусной кислоты возрастает пластичность древесины.

В дальнейшем при механическом воздействии на древесину образуется большое количество мелочи. Так, при выдержке щепы в водном растворе уксусной кислоты от 18 до 20 мин степень помола массы достигает 20...22 ДС и имеет тенденцию к увеличению при более продолжительной выдержке.

На графике, представленном на рис. 2, б, видно, что при уменьшении величины рабочего зазора наблюдается тенденция к росту степени помола массы: при рабочем зазоре 0,3...0,4 мм значение показателя степени помола массы достигает 20...22 ДС.

При увеличении угла наклона передней грани ножа ротора степень помола массы возрастает и достигает своего максимального значения 20...21 ДС при $\gamma = 35...41^\circ$.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, и уравнения (3) показал, что с ростом продолжительности выдержки щепы в водном растворе уксусной кислоты и уменьшением величины рабочего зазора возрастает фракционный показатель качества помола древесноволокнистого полуфабриката.

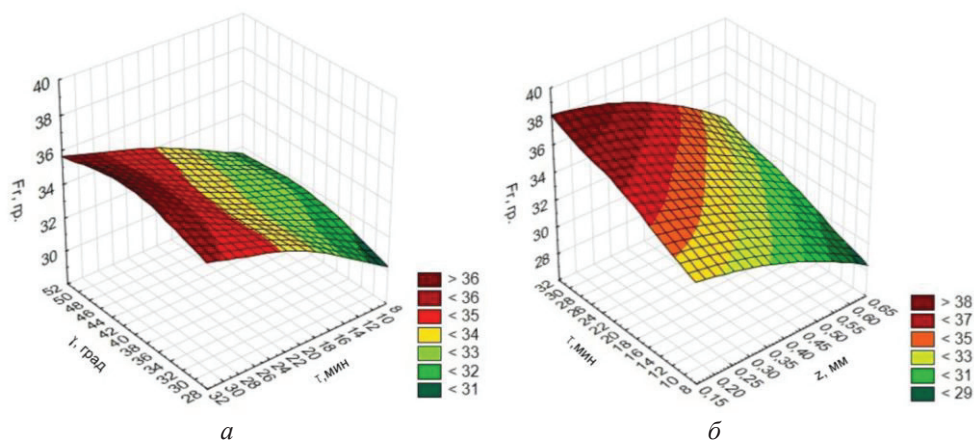


Рис. 3. Зависимость фракционного состава (Fr) древесноволокнистой массы от продолжительности выдержки (τ) щепы в водном растворе уксусной кислоты и угла наклона (γ) передней грани ножа ротора (а) и от величины рабочего зазора (z) и продолжительности выдержки (τ) щепы в водном растворе уксусной кислоты (б)

Fig. 3. Dependence of the fractional composition (Fr) of wood pulp on the time of chips exposure in an acetic acid aqueous solution and the angle of inclination (τ) of the front face of the rotor knife (а) and on the size of the working gap (z) and time of chips exposure (τ) in an acetic acid aqueous solution (б)

Таким образом, чем дольше щепка выдерживается в водном растворе уксусной кислоты и меньше величина рабочего зазора, тем больше древесноволокнистый полуфабрикат содержит древесной пыли и мелочи, что, в свою очередь, увеличивает значение фракционного показателя качества помола массы. С ростом угла наклона к передней грани ножа ротора значение фракционного показателя качества помола массы возрастает и достигает максимального – 35...36 г при $\gamma = 35...41^\circ$. С дальнейшим увеличением угла наклона передней грани ножа ротора значение фракционного показателя качества помола массы уменьшается.

Анализ результатов исследований показал, что оптимальными технологическими параметрами процесса получения древесноволокнистого полуфабриката являются: время выдержки в растворе уксусной кислоты – 18...20 мин,

величина рабочего зазора – 0,3...0,4 мм, угол наклона передней грани ножа – 35...41°.

Выводы

1. Статистическо-математические уравнения и графические зависимости, описывающие процесс размола щепы из отходов лесозаготовок в планко-крестовой мельнице, дают возможность прогнозировать получение качественного древесноволокнистого полуфабриката в зависимости от предложенных режимов процесса размола.

2. Установлены оптимальные режимные параметры, позволяющие выпускать древесноволокнистый полуфабрикат, имеющий наибольшие значения качественных показателей и пригодный для дальнейшего использования в производстве конструкционных, отделочных и изоляционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безруких Ю.А., Медведев С.О., Алашкевич Ю.Д., Мохирев А.П. Рациональное природопользование в условиях устойчивого развития экономики промышленных предприятий лесного комплекса // Экономика и предпринимательство. 2014. № 12-2. С. 994–996. [Bezrukikh Yu.A., Medvedev S.O., Alashkevich Yu.D., Mokhirev A.P. Environmental Management in the Conditions for Sustainable Economic Development Industrial Forestry Complex Enterprises. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Journal of Economy and Entrepreneurship], 2014, no. 12-2, pp. 994–996].

2. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах: дис ... д-ра техн. наук. Л., 1990. 375 с. [Goncharov V.N. *Theoretical Framework of Refining Fibrous Materials in Knife Machines*: Dr. Eng. Sci. Diss. Leningrad, 1990. 375 p.].

3. Зырянов М.А., Дресвянкин И.А., Рубинская А.В. Экспериментально-теоретическое обоснование физико-химических превращений древесной биомассы в технологии производства древесноволокнистых плит // Инж. вестн. Дона. 2016. № 4. Ст. № 158. [Zyryanov M.A., Dresvyankin I.A., Rubinskaya A.V. Experimental and Theoretical Study of Physical and Chemical Transformations of Woody Biomass in the Production Technology of Fibreboard. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 4, art. 158].

4. Зырянов М.А., Чистова Н.Г., Лазарева Л.И. Совершенствование работы размольного участка производства древесноволокнистых плит мокрым способом // Химия растит. сырья. 2011. № 3. С. 193–196. [Zyryanov M.A., Chistova N.G., Lazareva L.I. Improving the Work of the Grinding Section of the Fiberboard Production by the Wet Method. *Khimija rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw material], 2011, no. 3, pp. 193–196].

5. Зырянов М.А., Чистова Н.Г., Швецов В.А., Зарипов З.З. Переработка древесных отходов в производстве древесноволокнистых плит // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 4. С. 288–291. [Zyryanov M.A., Chistova N.G., Shvetsov V.A., Zaripov Z.Z. Wood Waste Processing for the Wood-Fiber Panels Production. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2011, no. 4, pp. 288–291].

6. Коротаев Э.И., Симонов В.И. Производство строительных материалов из древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 144 с. [Korotayev E.I., Simonov V.I. *Production of Construction Materials from Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1972. 144 p.].

7. Мохирев А.П., Аксенов Н.В., Шеверев О.В. О рациональном природопользовании и эксплуатации ресурсов в Красноярском крае // Инж. вестн. Дона. 2014. № 4-1. Ст. № 20. [Mokhirev A.P., Aksenov N.V., Sheverev O.V. On the Rational Management and Exploitation of Resources in the Krasnoyarsk Region. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 4-1, art. 20].

8. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 261 с. [Nikishov V.D. *Integrated Wood Utilization*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 261 p.].

9. Чистова Н.Г., Петрушева Н.А., Алашкевич Ю.Д., Трофимук В.Н. Оптимизация процесса размола в производстве древесноволокнистых плит мокрым способом // Фундаментальные исследования. 2006. № 11. С. 38–40. [Chistova N.G., Petrusheva N.A., Alashkevich U.D., Trofimuk V.N. Optimization of Refining Process in Wetherdboard Production. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2006, no. 11, pp. 38–40].

10. Bens O., Hüttl R.F. Energetic Utilisation of Wood as Biochemical Energy Carrier – A Contribution to the Utilisation of Waste Energy and Landuse. *International Journal of Thermal Sciences*, 2001, vol. 40, iss. 4, pp. 344–351. DOI: [10.1016/S1290-0729\(00\)01220-5](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)01220-5)

11. Chorny O. Influence of the Bretton Woods Institutions on Economic Growth: Literature Survey for Transitional Economic Systems. *Economics & Sociology*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 32–41. DOI: [10.14254/2071-789X.2011/4-2/4](https://doi.org/10.14254/2071-789X.2011/4-2/4)

12. Ferguson W. Why Wood Pulp is the World's New Wonder Material. *New Scientist*, 2012, iss. 2878. 24 p.

13. *Forests and Forestry in Sweden*. Stockholm, KSLA, 2015. 24 p. Available at: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/in-english/forests-and-forestry-in-sweden2015.pdf> (accessed 22.06.19).

14. Goldstein J. Finding New Markets for Local Waste Wood. *BioCycle*, 2002, vol. 43, no. 12, pp. 30.

15. Hellen E. Beyond Paper and Board – Leap in Resource-Efficiency with Nanocellulose and New Forming Techniques. *Forestcluster Ltd's Annual Seminar*. Helsinki, 2011. 25 p.

16. Mokhiev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (the Krasnoyarsk Territory as a Case Study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, iss. 3, pp. 313–319. DOI: [10.5937/jaes16-16908](https://doi.org/10.5937/jaes16-16908)

17. Shi S.Q., Gardner D., Pendleton D., Hoffard T. Timber Production from Reclaimed Creosote-Treated Wood Pilings: Economic Analysis and Quality Evaluation. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, no. 11-12, pp. 45–50.

18. Wood Waste Reduction. *Pollution Prevention Institute*. Topeka, Kansas State University, 2006. 12 p.

19. Zozulya V.V., Sakhanov V.V., Medvedev S.O., Bezrukih Y.A., Romanchenko O.V. The Features of Industrial Modernization Management in Forest Complex. *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 17), Albena, Bulgaria, June 29 – July 5, 2017*. Albena, SGEM, 2017, pp. 927–934.

20. Zozulya V.V., Romanchenko O.V., Zuykov A.V., Sergeeva A.Yu., Medvedev S.O., Zozulya I.V. Financial Stimulation of Forest Resources Deep Processing. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 312–318.

MODELING THE PRODUCTION PROCESSES OF WOOD-FIBER SEMI-FINISHED PRODUCTS AIMED AT EXPANSION OF THE RAW MATERIAL BASE OF FOREST ENTERPRISES

M.A. Zyryanov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

S.O. Medvedev, Candidate of Economics; ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy Street, 29, Lesosibirsk, 662543, Russian Federation; e-mail: zuryanov13@mail.ru, medvedev_serega@mail.ru

Currently, materials made of wood-fiber semi-finished products are widely used in house building as structural, finishing and insulating materials. According to the results analysis of numerous studies, the raw material for their production is technological chips of woodworking waste. While production, the chips are subjected to hydrothermal treatment and further grinding in disk knife grinding machines in two stages. Significant energy consumption of the wood fiber production process is driven not only by grinding wood chips in stages, but also by overcoming the hydrodynamic resistance of the aqueous environment, where grinding is carried out. The process of grinding wood chips, made of from chopping residues, in an aerodynamic medium on an upgraded cross-bar mill was studied in order to solve the problem of expanding the raw material base for the production of a wood fiber semi-finished product and reducing the energy intensity of the grinding process. The features of this process were analyzed and its effectiveness was assessed. The influence of the exposure time of wood chips of chopping residues in an acetic acid solution, the size of the working gap and the angle of inclination of the front edge of the knife on the grinding degree and fractional quality of wood pulp grinding was determined. Statistical and mathematical equations, that describe the studied process, were obtained, and the graphical dependencies are constructed. The following basic requirement is fulfilled for the dependencies: the experimental points for a total should lie quite close to the curve. These equations allow predicting the quality of wood pulp depending on the set modes of the grinding process; as well as determining the quality indicators of wood pulp with known values of the technological and structural parameters of the grinding machine. The efficiency of the process of obtaining the wood-fiber semi-finished product in an aerodynamic environment from wood chips produced as a result of chopping residues (branches, twigs, etc.) processing in a mobile wood chipper, is proven.

For citation: Zyryanov M.A., Medvedev S.O. Modeling the Production Processes of Wood-Fiber Semi-Finished Products Aimed at Expansion of the Raw Material Base of Forest Enterprises. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 176–183. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-176-183

Funding: The research was carried out with the support from the grant of the President of the Russian Federation for young scientists (candidates of sciences) MK-1902.2019.6; the project “Development and Implementation of an Effective Technology for Integrated Processing of Logging Waste” was supported by the Krasnoyarsk Regional Fund of support scientific and technical activities.

Keywords: fibrillation, grinding degree, chips, fiber, chopping residues, mathematical model, grinding.

Поступила 22.06.19 / Received on June 22, 2019



УДК 66.095.268+661.7+665.947.4
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-184-192

НИТРОВАНИЕ ГИДРОЛИЗНОГО ЛИГНИНА В ВОДНО-АПРОТОННЫХ СРЕДАХ

Д.Е. Лахманов, канд. хим. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [N-5418-2016](https://orcid.org/0000-0001-9940-4862),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9940-4862>

Ю.Г. Хабаров, д-р хим. наук, проф.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

В.А. Вешняков, канд. хим. наук, доц.; ResearcherID: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

М.Р. Ёкубжанов, аспирант

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

e-mail: dmi84339053@ya.ru, khabarov.yu@mail.ru, viacheslav.veshnyakov@mail.ru,
cool.mominjon@mail.ru

Технические лигнины образуются из природных лигнинов при химической или биохимической переработке растительного сырья. С помощью модификации из лигнинов можно получать ценные продукты, в том числе мономеры, полимерные материалы и композиты. Приводятся результаты исследования нитрования гидролизного лигнина в различных условиях. Цель исследования – получение нитрованного гидролизного лигнина с максимальным выходом и максимальным содержанием азота, поэтому нитрование проводили с помощью азотной кислоты в среде «вода – апротонный растворитель» (1,4-диоксан, диметилсульфоксид, тетрагидрофуран, диметилформамид, ацетонитрил). В качестве нитрующего реагента также был использован ацетилнитрат, который является смешанным ангидридом азотной и уксусной кислот. Поэтому расход уксусного ангидрида при синтезе ацетилнитрата был взят с учетом воды, присутствующей в концентрированной азотной кислоте. Ацетилнитрат получали с помощью реакции уксусного ангидрида и концентрированной азотной кислоты при комнатной температуре в течение 30 мин. В отличие от азотной кислоты ацетилнитрат является мягким нитрующим реагентом. Нитрование проводили в установке с обратным холодильником на кипящей водяной бане в течение 2...5 мин (нитрование азотной кислотой) или 1...60 мин (нитрование ацетилнитратом). По завершении реакции нитрования продукты были выделены, промыты дистиллированной водой и высушены до постоянной массы без нагревания. При нитровании азотной кислотой максимальный выход нитрованного гидролизного лигнина (83...101 %) достигается с использованием диоксана, ацетонитрила и тетрагидрофурана, а максимальное содержание азота (4,3...4,5 %) – с использованием 1,4-диоксана, ацетонитрила. Применение диметилсульфоксида и диметилформамида приводит к снижению выхода продукта до 23...35 %, к меньшему содержанию в нем азота 1,3...3,9 % и повышенному содержанию кислорода, что указывает на протекание не только нитрования, но и деполимеризации и окислительных превращений. При нитровании ацетилнитратом реакция проходит в течение 1...3 мин, при этом в продукте содержится до 4,7 % азота. На ИК-спектрах нитрованных гидролизных лигнинов появляются новые полосы поглощения при 1555 и 1710 см⁻¹, обусловленные наличием карбоксильных и нитро-групп.

Для цитирования: Лахманов Д.Е., Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Ёкубжанов М.Р. Нитрование гидролизного лигнина в водно-апротонных средах // Изв. вузов. Лесной журнал. 2020. № 5. С. 184–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-184-192

Финансирование: Исследования проведены при финансовой поддержке гранта РНФ № 18-73-00250 с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» САФУ.

Ключевые слова: гидролизный лигнин, нитрование, апротонные растворители, азотная кислота, ацетилнитрат.

Введение

Лигнин является вторым наиболее распространенным природным органическим материалом и считается одним из перспективных возобновляемых ресурсов. Технические лигнины получают из природных лигнинов при химической или биохимической переработке растительного сырья. Из нескольких десятков миллионов тонн технических лигнинов (в основном сульфатного) [19], образующихся при химической и биохимической переработке, в качестве товарного продукта используются менее 2 млн т [22]. Лигнин может найти применение в качестве: прекурсора, из которого получают низкомолекулярные продукты [12], в том числе ванилин [25]; связующего, эмульгаторов [23]; поверхностно-активных веществ [7]; сорбентов тяжелых металлов [16]; хелатирующих агентов [5]; суспендирующих пестициды веществ и кондиционеров почвы [15]; регуляторов роста растений [11] и др. Низкий уровень неэнергетического коммерческого использования промышленных лигнинов объясняется современной технологией сульфат-целлюлозного производства и отчасти неопределенностью структуры и непостоянством функционального состава. Вместе с тем в настоящее время интерес к разработке новых методов модификации технических лигнинов, получению новых материалов не снижается [10]. За последние 10 лет опубликовано более 80 обзоров и монографий, посвященных вопросам биохимии, строения, свойств, химии, модификации и использования лигнинов.

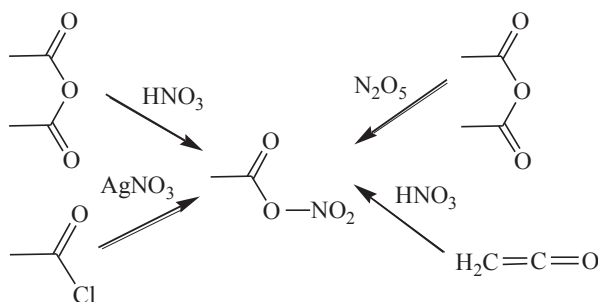
По способности растворяться в водных растворах лигнины можно подразделить на 3 группы: водорастворимые, растворимые в водных растворах с ограниченной областью рН и практически нерастворимые в водных растворах. Первая группа представлена лигносульфоновыми кислотами и сульфометилированными производными натронного и сульфатного лигнинов [8]. Вторая – лигнины растворимые в водно-щелочных растворах (натронный и сульфатный) [13]. Третья – сильно конденсированные лигнины, например гидролизный лигнин (ГЛ) [14, 17].

С помощью различных методов модификации из лигнинов можно получать мономеры, полимерные материалы и композиты [9]. При модификации лигнинов проводят конденсацию с образованием нерастворимых продуктов, изменяют молекулярную массу вплоть до получения мономеров или вводят новые функциональные группы.

Одним из методов модификации лигнинов является реакция нитрования, при которой происходит электрофильное замещение атомов водорода ароматического кольца [6]. Нитрование органических соединений – удобный инструмент, так как нитросоединения используют в качестве прекурсоров при синтезе органических соединений различных классов или как конечные продукты [20]. Для нитрования применяется большое число реагентов: азотная кислота, смесь азотной кислоты с серной или другими кислотами, оксиды азота, нитраты различных металлов (алюминия, меди, железа, циркония, магния, висмута, натрия), органические нитриты, нитромочевина, смешанные ангид-

риды азотной и органических кислот, хлористый нитрил и соли нитрония (тетрафторборат нитрония) [24]. Азотная кислота в реакции с лигнином выступает как нитрующий агент. В то же время она является окислителем и оказывает большое влияние на лигноцеллюлозные материалы [2, 3]. В зависимости от условий азотная кислота может выступать в качестве слабого или сильного окислителя.

Ацетилнитрат – мягкий нитрующий реагент, является смешанным ангидридом азотной кислоты и уксусного ангидрида. Его можно синтезировать из производных уксусной кислоты в соответствии с схемой [18, 21]:



Часто нитрование сопровождается окислительными превращениями и сильной деполимеризацией лигнина. Нитрование лигнина азотной кислотой в водно-этанольной среде вызывает глубокую деполимеризацию и используется в количественном анализе для определения холоцеллюлозы.

Цель исследования – изучение возможности нитрования гидролизованного лигнина (ГЛ) при минимальном разрушении полимерной матрицы для получения продукта с максимальным выходом и максимальным содержанием азота.

Объекты и методы исследования

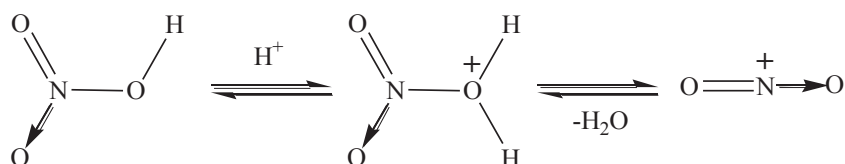
При проведении нитрования в качестве растворителей были использованы (квалификация х.ч.): 1,4-диоксан (диоксан), диметилсульфоксид (ДМСО), диметилформамид (ДМФА), тетрагидрофуран (ТГФ), ацетонитрил (АЦН), ГЛ Кировского биохимического завода. Перед выполнением экспериментов лигнин предварительно был освобожден от водо- и эфирорастворимых веществ и фракционирован, использовали фракцию размером 0,5...1 мм. Элементный состав (%) исходного ГЛ: N (0,2), С (62,4), Н (6,8).

Нитрование ГЛ проводили в установке с обратным холодильником на водяной бане в течение заданного времени. В случае нитрования азотной кислотой в реакционную колбу помещали 0,5 г ГЛ и реагент, который готовили путем смешения 2,5 мл азотной кислоты концентрацией 65,8 % с 10 мл растворителя. При нитровании ГЛ ацетилнитратом в реакционную колбу помещали 0,7 г ГЛ и реагент, который готовили из 5 мл диоксана и 2,4 мл раствора ацетилнитрата. Ацетилнитрат синтезировали из концентрированной азотной кислоты и уксусного ангидрида, взятых в объемном соотношении 1:3,5 соответственно [18]. По завершении реакции осадок нитрованного ГЛ отделяли вакуум-фильтрованием, промывали водой, сушили до постоянной массы в вакуум-эксикаторе и определяли выход относительно массы исходного ГЛ.

ИК-спектры исходного и нитрованного ГЛ записывали на ИК-Фурье спектрофотометре FTIR-8400S (Shimadzu, Япония) в диапазоне волновых чисел $600 \dots 4000 \text{ см}^{-1}$ с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения MIRacle™ с призмой из селенида цинка (Pike Technologies, США). Элементный состав был определен на CHNS-анализаторе EuroEA-3000 (EuroVector, Италия).

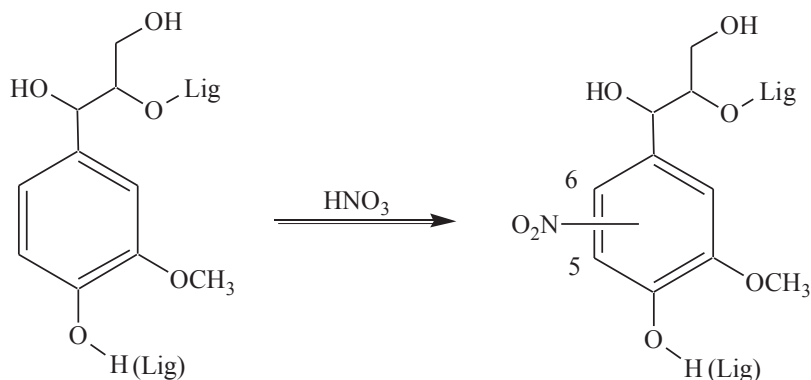
Результаты исследования и их обсуждение

Нитрование ароматических соединений в основном представляет собой реакцию электрофильного замещения, в которой активной частицей является катион нитрония, образующийся в результате протолитических превращений:



Концентрация катиона нитрония в реакционной среде зависит от многих факторов. В растворах азотной кислоты с концентрацией менее 95 % катион нитрония не определяется. Разбавленными растворами можно нитровать активированные электронодонорными группами ароматические соединения. Равновесие сдвигается вправо в смешанных растворах азотной и сильных кислот (серная, фосфорная).

При нитровании гваяцильных звеньев лигнина в зависимости от наличия свободной или этерифицированной фенольной гидроксильной группы реакция происходит в положении 5 или 6 соответственно:



В выполненных ранее исследованиях [4] было установлено, что при нитровании ГЛ азотной кислотой в водно-диоксановой среде при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит практически полная деполимеризация ГЛ в течение $15 \dots 30$ мин. В продуктах накапливаются не только нитропроизводные ГЛ, но и сильно окисленные. Поэтому для достижения поставленной цели были осуществлены эксперименты, в которых нитрование проводили в течение $2 \dots 5$ мин. Кроме того, было оценено влияние вида апротонного растворителя. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние условий нитрования ГЛ азотной кислотой на состав и выход продуктов

Растворитель		τ , мин	W^{**}	Элементный состав, %				Вклад кислорода NO_2 -групп, %	ΔO^{***}
Название	ε^*			N	C	H	O		
Диоксан	2,21	2	92	4,3	46,0	5,3	44,4	14,1	13,8
		5	83	4,5	45,7	5,5	44,3	14,8	13,7
ДМСО	47,00	2	46	3,2	47,2	6,0	43,6	10,5	13,0
		5	23	1,3	42,0	6,9	49,8	4,3	19,2
ДМФА	37,60	2	68	4,0	47,2	5,5	43,3	13,1	12,7
		5	35	2,8	45,8	6,3	45,1	9,2	14,5
ТГФ	7,39	2	100	2,7	50,9	6,2	40,2	8,9	9,6
		5	97	3,6	48,8	5,8	41,8	11,8	11,2
АЦН	37,40	2	101	4,5	45,6	5,3	44,6	14,8	14,0
		5	99	4,5	44,6	5,2	45,7	14,8	15,1

* ε – диэлектрическая проницаемость; ** W – выход нитрованного ГЛ, %; *** ΔO – разница в содержании O в нитрованном и исходном ГЛ, %

Как видно из табл. 1, при использовании диоксана и АЦН нитрование ГЛ азотной кислотой происходит очень быстро и после 2 мин реакции содержание азота в продуктах достигает 4,3...4,5 %, увеличение продолжительности реакции до 5 мин практически не влияет на этот показатель. При этом выход продуктов составляет 83...101 %. Выход продуктов нитрования при использовании АЦН не зависит от продолжительности, в то время как в случае диоксана выход снижается примерно на 10 %. Доля кислорода в элементном составе продуктов нитрования значительно больше, чем в исходном ГЛ. Эта величина складывается из кислорода исходного ГЛ, кислорода нитрогрупп и кислорода, обусловленного группами, образующимися за счет окислительных процессов.

Оказалось, что при нитровании в водно-диоксановой и водно-ацетонитрильной средах прирост содержания кислорода в продуктах реакции практически полностью обусловлен кислородом нитрогрупп. В то время как нитрование в ДМСО и ДМФА сопровождается окислительными превращениями. Применение ТГФ оказалось менее эффективно для получения высоконитрованного продукта, окислительные процессы практически не происходят. По-видимому, различия в результатах нитрования можно объяснить влиянием диэлектрической проницаемости растворителей, за исключением АЦН. Для оценки окислительных процессов был вычислена разница между содержанием в продуктах реакции кислорода, входящего в состав нитрогрупп. Применение ДМСО и ДМФА при нитровании приводит к сильной деполимеризации в первые минуты реакции, при этом содержание азота достигает 1,3...4,0 %.

В дальнейшем нитрование ГЛ проводили ацетилнитратом. Известно, что ацетилнитрат является мягким нитрующим реагентом, который используется при синтезе различных нитросоединений, в том числе нитрофенолов. Нитрование проводили в течение 1...60 мин (табл. 2).

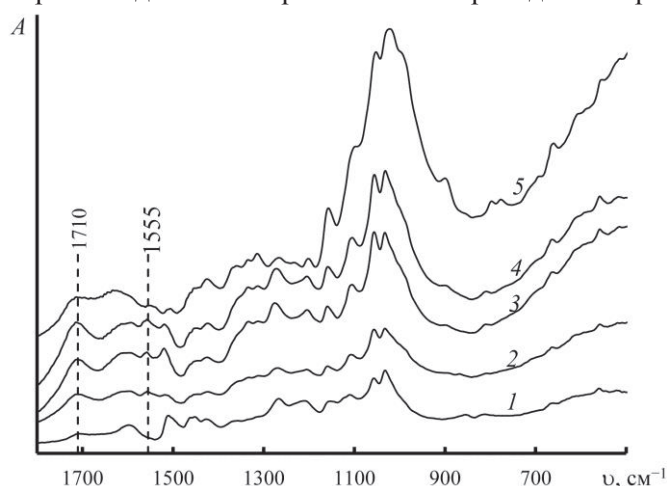
Таблица 2

Элементный состав и выход нитрованного ГЛ при нитровании ацетилнитратом

№	Продолжительность нитрования, мин	Выход нитрованного ГЛ, %	Элементный состав, %			
			N	C	H	O
1	0	100	0,2	62,4	6,8	30,6
2	1	103	4,7	50,5	5,1	39,7
3	3	101	4,6	49,0	5,3	41,1
4	15	99	4,5	48,9	5,2	41,4
5	60	97	4,4	49,4	5,1	41,1

Как видно из табл. 2, ацетилнитрат практически не оказывает деполимеризирующего влияния на ГЛ, так как выход нитрованного ГЛ близок к массе исходного ГЛ. Нитрование проходит быстро и уже через 1 мин содержание азота достигает максимальной величины 4,7 %. Увеличение содержания кислорода обусловлено кислородом, входящим в состав нитрогрупп, окислительных превращений не наблюдается.

ИК-спектры исходного и нитрованных ГЛ приведены на рисунке.



ИК-спектры ГЛ: исходного (1) и нитрованных с использованием ацетилнитрата (2) или азотной кислоты с АЦН (3), диоксаном (4) и ДМСО (5)

IR spectra of the initial (1) and nitrated hydrolysis lignin using acetyl nitrate (2) or nitric acid with acetonitrile (3), dioxane (4), and dimethyl sulfoxide (5)

На спектрах нитрованных ГЛ появилась новая полоса поглощения при 1555 см^{-1} и значительно увеличилась полоса поглощения при 1710 см^{-1} . Это может быть объяснено наличием соответственно карбоксильных и ароматических нитрогрупп [1].

Заключение

Таким образом, установлено, что для нитрования ГЛ можно использовать ацетилнитрат или проводить реакцию с азотной кислотой в течение 2...5 мин в присутствии диоксана или ацетонитрила. В этих условиях дости-

гаются максимальное содержание азота в продуктах и минимальная степень деполимеризации. Предполагается, что такие продукты могут найти применение в качестве сорбентов и прекурсоров для последующей функционализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беллами Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул / пер. с англ. М.: Мир, 1971. 318 с. [Bellamy L.J. *The Infra-Red Spectra of Complex Molecules*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1971. 318 p.]. DOI: [10.1007/978-94-011-6017-9](https://doi.org/10.1007/978-94-011-6017-9)
2. Гоготов А.Ф., Панасенков Ю.В., Панчуков И.Л., Шилкин Е.В., Бабкин В.А. Повышение экологической безопасности технологии нитрования лигнина // Химия в интересах устойчивого развития. 1996. № 4. С. 245–257. [Gogotov A.F., Panasenkov Yu.V., Panchukov I.L., Shilkin E.V., Babkin V.A. Improving the Environmental Safety of Lignin Nitration Technology. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 1996, no. 4, pp. 245–257].
3. Топчев А.В. Нитрование углеводородов и других органических соединений. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 488 с. [Topchiev A.V. *Nitration of Hydrocarbons and Other Organic Compounds*. Moscow, AN SSSR Publ., 1956. 488 p.]. DOI: [10.1016/c2013-0-05254-1](https://doi.org/10.1016/c2013-0-05254-1)
4. Хабаров Ю.Г., Лахманов Д.Е. Деполимеризация конденсированных лигнинов под действием азотной кислоты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 5. С. 176–182. [Habarov U.G., Lakhmanov D.E. Depolymerization of Condensed Lignins with Hydrogen Nitrate. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 5, pp. 176–182]. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/99a/2-_-depolimerizatsiya-kondensirovannykh-ligninov-pod-deystviem-azotnoy-kisloty_-pdf
5. Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Кузяков Н.Ю. Получение и применение комплексов лигносульфоновых кислот с катионами железа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 167–187. [Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Kuzyakov N.Yu. Preparation and Application of Complexes of Lignosulfonic Acids with Iron Cations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 167–187]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.5.167](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.167), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/73e/167_187.pdf
6. Adams J.P. Nitro and Related Groups. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 1*, 2002, iss. 23, pp. 2586–2597. DOI: [10.1039/b009711j](https://doi.org/10.1039/b009711j)
7. Al-Saraireh F.M., Svinoroev Y. Assessment of Casting Binding Materials Based on Modified Technical Lignosulfonates. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 2020, vol. 10, iss. 2, pp. 335–346.
8. Aro T., Fatehi P. Production and Application of Lignosulfonates and Sulfonated Lignin. *ChemSusChem*, 2017, vol. 10, iss. 9, pp. 1861–1877. DOI: [10.1002/cssc.201700082](https://doi.org/10.1002/cssc.201700082)
9. Belgacem M.N., Gandini A. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 552 p.
10. Cazacu G., Capraru M., Popa V.I. Advances Concerning Lignin Utilization in New Materials. *Advances in Natural Polymers*. Ed. by S. Thomas, P. Visakh, A. Mathew. Berlin, Springer, 2013, pp. 255–312. DOI: [10.1007/978-3-642-20940-6_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20940-6_8)
11. Chen J., Fan X., Zhang L., Chen X., Sun S., Sun R.-C. Research Progress in Lignin-Based Slow/Controlled Release Fertilizer. *ChemSusChem*, 2020, vol. 13, iss. 17, pp. 4356–4366. DOI: [10.1002/cssc.202000455](https://doi.org/10.1002/cssc.202000455)
12. Chio C., Sain M., Qin W. Lignin Utilization: A Review of Lignin Depolymerization from Various Aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 232–249. DOI: [10.1016/j.rser.2019.03.008](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.008)

13. Christopher L.P. Integrated Forest Biorefineries: Current State and Development Potential. Ch. 1. *Integrated Forest Biorefineries: Challenges and Opportunities*. London, Royal Society of Chemistry, 2012, pp. 1–66. DOI: [10.1039/9781849735063-00001](https://doi.org/10.1039/9781849735063-00001)
14. Evstigneyev E.I., Yuzikhin O.S., Gurinov A.A., Ivanov A.Yu., Artamonova T.O., Khodorkovskiy M.A., Bessonova E.A., Vasilyev A.V. Study of Structure of Industrial Acid Hydrolysis Lignin, Oxidized in the H₂O₂-H₂SO₄ System. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2016, vol. 36, iss. 4, pp. 259–269. DOI: [10.1080/02773813.2015.1137945](https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1137945)
15. Fernández-Pérez M., Garrido-Herrera F.J., González-Pradas E. Alginate and Lignin-Based Formulations to Control Pesticides Leaching in a Calcareous Soil. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 190, iss. 1-3, pp. 794–801. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2011.03.118](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.118)
16. Guo X., Zhang S., Shan X.-Q. Adsorption of Metal Ions on Lignin. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 151, iss. 1, pp. 134–142. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2007.05.065](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.065)
17. Huo P., Savitskaya T., Reznikov I., Hrynshpan D., Tsygankova N., Telysheva G., Arshanitsa A. Hydrolysis Lignin as a Sorbent and Basis for Solid Composite Biofuel. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2016, vol. 7, no. 11, pp. 501–530. DOI: [10.4236/abb.2016.711046](https://doi.org/10.4236/abb.2016.711046)
18. Louw R. Acetyl Nitrate. *Encyclopedia of Reagents for Organic Synthesis*. Ed. L.A. Parquette. New York, John Wiley & Sons, 2001. DOI: [10.1002/047084289X.ra032](https://doi.org/10.1002/047084289X.ra032)
19. Mimini V., Kabrelian V., Fackler K., Hettegger H., Potthast A., Rosenau T. Lignin-Based Foams as Insulation Materials: A Review. *Holzforschung*, 2018, vol. 73, iss. 1, pp. 117–130. DOI: [10.1515/hf-2018-0111](https://doi.org/10.1515/hf-2018-0111)
20. Olah G.A., Malhotra R., Narang S.C. *Nitration: Methods and Mechanisms*. New York, VCH Publishers, 1989. 330 p.
21. Rodrigues J.A.R., de Oliveira Filho A.P., Moran P.J.S., Custódio R. Regioselectivity of the Nitration of Phenol by Acetyl Nitrate Adsorbed on Silica Gel. *Tetrahedron*, 1999, vol. 55, iss. 22, pp. 6733–6738. DOI: [10.1016/S0040-4020\(99\)00320-8](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(99)00320-8)
22. Sathesh Kumar M.N., Mohanty A.K., Erickson L., Misra M. Lignin and Its Applications with Polymers. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2009, vol. 3, no. 1, pp. 1–24. DOI: [10.1166/jbmb.2009.1001](https://doi.org/10.1166/jbmb.2009.1001)
23. Stevens J., Gardner D.J. Enhancing the Fuel Value of Wood Pellets with the Addition of Lignin. *Wood and Fiber Science*, 2010, vol. 42, no. 4, pp. 439–443.
24. Thiemann M., Scheibler E., Wiegand K.W. Nitric Acid, Nitrous Acid, and Nitrogen Oxides. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim, Wiley-VCH, 2000. 50 p. DOI: [10.1002/14356007.a17_293](https://doi.org/10.1002/14356007.a17_293)
25. Wang Y., Sun S., Li F., Cao X., Sun R. Production of Vanillin from Lignin: The Relationship between β-O-4 Linkages and Vanillin Yield. *Industrial Crops and Products*, 2018, vol. 116, pp. 116–121. DOI: [10.1016/j.indcrop.2018.02.043](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.043)

NITRATION OF HYDROLYSIS LIGNIN IN WATER-APROTIC SOLVENT MIXTURES

D.E. Lakhmanov, Candidate of Chemistry, Research Scientist;

ResearcherID: [N-5418-2016](https://orcid.org/0000-0001-9940-4862), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9940-4862>

Yu.G. Khabarov, Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

V.A. Veshnyakov, Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

M.R. Yokubjanov, Postgraduate Student

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: dmi84339053@ya.ru, khabarov.yu@mail.ru, viacheslav.veshnyakov@mail.ru, cool.mominjon@mail.ru

Industrial lignins are formed from native lignins during chemical or biochemical processing of plant raw materials. Lignins can be modified to produce valuable products, including monomers, polymeric materials, and composites. The article presents the results of a study of hydrolysis lignin nitration under various conditions. The aim of the study was to obtain a nitrated hydrolysis lignin with a maximum yield and maximum nitrogen content. Therefore, the nitration was carried out using nitric acid in a water-aprotic solvent binary mixtures (1,4-dioxane, dimethyl sulfoxide, tetrahydrofuran, dimethylformamide, acetonitrile). Acetyl nitrate, which is a mixed anhydride of nitric and acetic acids, was also used as a nitrating agent. In this regard, the consumption of acetic anhydride in the synthesis of acetyl nitrate was used taking into account the water present in concentrated nitric acid. Acetyl nitrate was obtained by the reaction of acetic anhydride and concentrated nitric acid at room temperature for 30 min. Acetyl nitrate is a mild nitrating agent opposed to nitric acid. Nitration was carried out under reflux in a boiling water bath for 2–5 min (with nitric acid) or 1–60 min (with acetyl nitrate). Upon completion of the nitration reaction, the products were filtered, washed with distilled water and dried to constant weight without heating. When nitration was performed with nitric acid, the maximum yield of nitrated hydrolysis lignin (83–101 %) was achieved using 1,4-dioxane, acetonitrile, and tetrahydrofuran; and the maximum nitrogen content (4.3–4.5 %) was achieved using 1,4-dioxane or acetonitrile. The use of dimethyl sulfoxide and dimethylformamide leads to a decrease in the product yield to 23–35 %, to a lower nitrogen content of 1.3–3.9 % and an increased oxygen content, which indicates the occurrence of not only nitration, but also depolymerization and oxidative transformations. When nitration with acetyl nitrate, the reaction takes place for 1–3 min, herewith the product contains up to 4.7 % of nitrogen. On the IR spectra of nitrated hydrolysis lignins, new absorption bands appear at 1555 and 1710 cm^{-1} due to the appearance of carboxyl and nitro groups.

For citation: Lakhmanov D.E., Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Yokubjanov M.R. Nitration of Hydrolysis Lignin in Water-Aprotic Solvent Mixtures. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 184–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-184-192

Funding: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 18-73-00250 using the equipment of the NArFU's Core Facility Center "Arktika".

Keywords: hydrolysis lignin, nitration, aprotic solvents, nitric acid, acetyl nitrate.

Поступила 14.02.20 / Received on February 14, 2020

УДК 676.22.017:677.1.002.68

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-193-200

ЦЕЛЛЮЛОЗНАЯ МАССА ИЗ КОРЫ ВЕТОК ТУТОВНИКА ДЛЯ БУМАЖНОЙ ОТРАСЛИ

Х.А. Бабаханова, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAN-3856-2020](https://orcid.org/0000-0002-6956-2824),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-2824>

З.К. Галимова, ассистент; ResearcherID: [AAN-2449-2020](https://orcid.org/0000-0003-0958-8579),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0958-8579>

М.М. Абдуназаров, соискатель; ResearcherID: [AAN-2711-2020](https://orcid.org/0000-0002-0099-8312),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0099-8312>

И.И. Исмаилов, ассистент; ResearcherID: [AAN-2481-2020](https://orcid.org/0000-0003-0864-0056),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0864-0056>

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, ул. Шохжахон-5, г. Ташкент, Узбекистан, 100100; e-mail: halima300@inbox.ru, z.galimova8282@mail.ru, abduazarov.1977@mail.ru, ikromzhon.ismailov@bk.ru

Узбекистан – безлесная страна, занимающая пятое место в мире по производству хлопка, третье после Китая и Индии – по производству шелка. Согласно государственной программе республики, расширение земельной площади для тутовых плантаций способствует росту производства шелка, в связи с чем увеличивается количество отходов, т. е. веток тутового дерева, не имеющих после удаления листьев промышленного применения. Их использование в качестве сырья для изготовления целлюлозной массы актуально, так как направлено на решение не только сырьевой, но и экологической проблемы. Цель исследования – изучение свойств бумаги из целлюлозы, полученной на основе хлопковой целлюлозы из линта с добавлением целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника. В ходе эксперимента с веток тутовника срезалась кора, которая замачивалась на некоторое время в воде, после чего с нее соскабливался наружный твердый слой, а более мягкий внутренний слой в течение нескольких часов подвергался варке. Сваренный луб после промывки водой размалывался до 30 °ШР в лабораторном роле при следующих условиях: концентрация массы – 1 %, температура – 22 °С. К нему добавлялось заданное количество хлопковой целлюлозы из линта (степень помола 45 °ШР). В лабораторных условиях на листоотливном аппарате получены бумажные отливки массой 80 г/м². Выявлено, что бумага из хлопковой и целлюлозы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника обладает низкой белизной, которая зависит от исходной белизны добавляемых волокон. Установлено, что добавка 30 % целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника при степени помола 30 °ШР способствует получению прочной бумаги, однако большие добавки отрицательно влияют на ее белизну.

Для цитирования: Бабаханова Х.А., Галимова З.К., Абдуназаров М.М., Исмаилов И.И. Целлюлозная масса из коры веток тутовника для бумажной отрасли // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С.193–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-193-200

Ключевые слова: целлюлозная масса, кора веток тутовника, степень помола, бумага, белизна, разрывное усилие, разрывная длина, сопротивление изгибу.

Введение

В настоящее время для динамичного развития и совершенствования целлюлозно-бумажной отрасли, объем производства которой составляет свыше 400 млн т бумаги и картона, необходимо учитывать характерные для технологии бумаги и картона современные тенденции использования вторичного волокна в качестве волокнистых полуфабрикатов [10, 22].

Применение вторичного волокна, получаемого в результате процесса переработки макулатуры или из отходов производства, снижает потребление дефицитного первичного волокна (целлюлозы (беленой и небеленой) из древесины различных пород) и механической (древесной) массы, что актуально с экономической и экологической точек зрения [15].

Широкое использование вторичного сырья (макулатуры) с 70-х гг. прошлого века объясняется сложившейся ситуацией, т. е. многократным повышением цен на энергоносители и активным действием защитников окружающей среды. Применение современных технологий и высокоэффективного оборудования для переработки макулатуры обеспечило расширение номенклатуры макулатурных видов бумаги не только в газетном секторе, но и в секторе высококачественных печатных видов бумаги [7, 14, 15].

Многочисленные исследования ученых и специалистов целлюлозно-бумажной промышленности посвящены поиску альтернативного, помимо макулатуры, доступного сырья для производства целлюлозной массы и бумаги без уничтожения лесов и разрушения окружающей среды. Разрабатываются технологии производства целлюлозной массы из ежегодно возобновляющихся и имеющихся в большом количестве растительных материалов – сельскохозяйственных отходов (жмых сахарного тростника, шелухи и соломы [3, 5, 19, 23], стеблей кукурузы [12]), волокнистых культур и диких растений, например, таких как бамбук [24], кенаф [2, 4, 25], джут [6], а также из отходов текстиля [11, 21] и фармацевтической промышленности (солодкового корня после экстракции) [13].

Узбекистан – безлесная страна, занимающая пятое место в мире по выпуску хлопка, третье после Китая и Индии – по выпуску шелка. Богатые традиции производства шелка – источника твердой валюты, климат и высокая плотность населения в Узбекистане делают шелководство перспективной отраслью для инвестиций, в связи с чем планируется увеличить экспорт шелковой продукции более чем в 10 раз [16].

Листья тутового дерева (шелковицы), особенно белой, являются источником питания личинок тутового шелкопряда, куколка которого необходима для производства шелка. На востоке это дерево считается священным. В нем все полезно: корни, ветки, листья, плоды [1].

Листья тутового дерева также используются в народной и современной научной медицине [9, 18]. Из его спелых ягод получают пищевой краситель, который применяется в пищевой, фармацевтической и медицинской промышленности [20]. Плотная и упругая древесина издавна используется для производства музыкальных инструментов, посуды, сувениров [8]. Из внутренней части коры (луба) изготавливаются веревки и волокно для выпуска грубых тканей. В Китае научились производить бумагу из мелко измельченных волокон шелка, пеньки, тряпья и коры шелковицы [17].

Согласно постановлению Президента Республики Узбекистан [16], реализуется комплекс мер по развитию шелковой отрасли. Выделение и расширение земельной площади для тутовых плантаций способствует росту производства шелка, в связи с чем увеличивается общее количество отходов, т. е. веток тутового дерева, не имеющих после удаления листьев промышленного применения. Их использование в качестве сырья для производства целлюлозной массы актуально, так как направлено на решение сырьевых и экологических проблем.

Цель исследования – изучение свойств бумаги из целлюлозы, полученной на основе хлопковой целлюлозы из линта с добавлением целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

получена бумага на основе хлопковой целлюлозы из линта с добавлением целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника;

исследован технологический режим процесса размола для выявления степени влияния добавляемой целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника на свойства бумаги и определения оптимального композиционного состава;

изучены характеристики полученного материала и предложены рекомендации по его применению.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали целлюлозу внутреннего слоя коры ветвей тутовника, полученную в условиях кустарной фабрики «Мерос» г. Самарканда Республики Узбекистан, и целлюлозу из хлопкового линта, свойства которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства целлюлозы

Показатель	Целлюлоза	
	из хлопкового линта	из внутреннего слоя коры ветвей тутовника
Содержание α -целлюлозы, % (ГОСТ 6840–78)	99,1	85,6
Степень полимеризации, % (ГОСТ 9105–74)	1600	1700
Белизна, % (ГОСТ 30113–94 (ИСО 2470–77))	77	34
Зольность, % (ГОСТ 7629–93)	0,50	0,85

Целлюлозную массу получали из неиспользуемых в промышленности веток тутового дерева после удаления листьев. С них срезали кору, которую замачивали на некоторое время в воде, после чего с нее соскабливали наружный твердый слой, который разделяли на грубый внешний и более мягкий внутренний. Из внешнего слоя изготавливали бумагу низкого сорта, а внутренний слой, взятый за основу исследования, в течение нескольких часов подвергали варке в открытых чанах. Сваренный луб после промывки водой размалывали в лабораторном ролле при следующих условиях: концентрация массы – 1 %, температура – 22 °С.

На листоотливном аппарате получали бумажные отливки массой 80 г/м², в качестве наполнителя использовали каолин (расход – 4 % по отношению к массе). Для поверхностной проклейки использовали 2 %-й раствор карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Степень помола хлопковой целлюлозы (ХЦ) – 45 °ШР, целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника (ТЦ) – 10 °ШР. Свойства образцов бумаги приведены в табл. 2.

Таблица 2

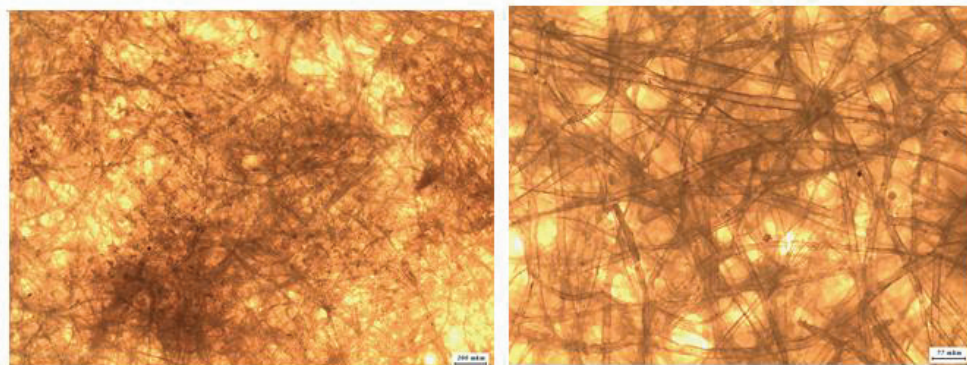
Показатели физико-механических свойств образцов бумаги

Композиционный состав бумаги ХЦ:ТЦ, %	Белизна, %	Разрушающее усилие, Н	Разрывная длина, м	Сопротивление излому, число двойных перегибов	Зольность, %
100:0	77	58,1	4940	300	1,2
90:10	70	59,2	5030	180	1,3
80:20	57	61,2	5200	150	1,3
70:30	54	59,7	5080	50	1,4
0:100	34	35,4	3010	30	1,5
0:100 (макулатура марки МС-5Б)	–	47,0	3190	71	4,9

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе анализа свойств образцов бумаги (табл. 2) выявлено, что целлюлозная масса из веток тутового дерева отличается по свойствам от макулатурной массы, изначально обладающей пониженными бумагообразующими свойствами (малой прочностью индивидуальных волокон, слабой способностью к образованию межволоконных связей и механическому сцеплению волокон в процессе формования полотна).

Разрушающее усилие, определенное по ГОСТ ИСО 1924-1–96, характеризовало максимальную силу, которую выдержал образец бумаги до разрушения. Используя результаты испытаний, рассчитали разрывную длину полосы бумаги определенной равномерной ширины, которая будучи подвешенной за один конец, разорвалась под действием собственной массы. Значения механической прочности образцов бумаги характеризовали прочность как самих волокон, так и сил связи между различными растительными волокнами от их взаимного расположения, ориентации и плотности укладки (см. рисунок).



Микрофотографии поверхности бумаги, в составе которой хлопковая целлюлоза и целлюлоза из внутреннего слоя коры ветвей тутовника при различной степени увеличения

Microphotographs of the paper surface, that contains cotton pulp and pulp of inner layer of mulberry branch bark, at various degrees of magnification

Белизна бумаги, в составе которой хлопковая целлюлоза и целлюлоза из внутреннего слоя коры ветвей тутовника, зависит от степени белизны самих добавляемых исходных волокон.

На следующем этапе исследований устанавливали степень влияния добавляемой целлюлозы на свойства бумаги и находили оптимальный композиционный состав бумажной массы при изменении технологического режима процесса размола – одного из факторов, определяющих степень разработки волокон (изменение их длины, степени фибрилляции) и, следовательно, качество бумажной массы, а в конечном итоге – и готовой продукции.

В связи с этим увеличение механической прочности исследуемой бумаги относительно прочности хлопковой целлюлозы можно объяснить тем, что меньшая продолжительность размола способствовала образованию массы фибриллированных волокон внутреннего слоя коры ветвей тутовника, а значит, и лучшему механическому переплетению волокон.

На следующем этапе, после варки внутреннего слоя коры веток тутового дерева и промывки горячей водой, проводили отбеливание в щелочной среде раствором пероксида водорода при расходе 3...4 % от массы абсолютно сухой целлюлозы, гидромодуле 1:5, температуре 70...95 °С в течение 60...90 мин. После промывки размол осуществляли в лабораторном ролле при следующих условиях: концентрация массы – 1 %, температура – 22 °С. Степень помола хлопковой целлюлозы – 45 °ШР, целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника – 30 °ШР. Получали бумажные отливки массой 80 г/м² на листоотливном аппарате. Свойства образцов бумаги представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели физико-механических свойств образцов бумаги после отбеливания

Композиционный состав бумаги ХЦ:ГЦ, %	Белизна, %	Разрушающее усилие, Н	Разрывная длина, м	Сопротивление излому, число двойных перегибов
100:0	82	49,1	4180	280
90:10	80	51,1	4340	300
80:20	79	53,6	4560	320
70:30	78	55,6	4730	350
0:100	74	60,1	5110	550

По результатам исследований (табл. 3) выявлено, что при испытании полоски бумаги, укрепленной в зажимах разрывной машины, разрыв по слабому месту происходит при силе от 51,1 до 55,6 Н, характеризующей силу связи между исходными волокнами, но не прочность самих волокон. Предполагаем, что увеличение степени помола бумажной массы привело к изменению длины волокон при незначительном снижении механической прочности.

Таким образом, добавление целлюлозы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника со степенью помола 30 °ШР в хлопковую бумажную массу позволило получить бумагу, где значительных или даже резких изменений механической прочности и белизны не наблюдалось.

Прочность взятых для добавления в бумажную массу растительных волокон из веток тутовника, выраженная длиной цепочек целлюлозы, т. е. степенью полимеризации (см. табл. 1), оказала влияние на сопротивление бумаги на излом при многократных перегибах. Высокие значения сопротивления бумаги излому наблюдаются у бумаги, степень помола бумажной массы которой составляла 30 °ШР. Это еще раз подтверждает, что физико-механические по-

казатели исходных растительных волокон при увеличении степени помола бумажной массы способствуют получению прочной к сопротивлению бумаги, на которую действует растягивающая сила, равная $(9,91 \pm 0,20)$ Н, до разрушения по линии изгиба.

Выводы

1. Оптические свойства бумаги, в составе которой хлопковая целлюлоза и целлюлоза из внутреннего слоя коры ветвей тутовника, можно объяснить степенью белизны добавляемых волокон.

2. Выявлено, что добавка целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника способствует получению прочной бумаги.

3. Установлено, что добавление в бумажную массу свыше 30 % целлюлозной массы из внутреннего слоя коры ветвей тутовника нежелательно, так как это отрицательно влияет на белизну бумаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабаджанова З.Х., Кароматов И.Д., Жумаев Б.З., Алымова Д.К. Шелковица, тут: применение в древней, современной народной и научной медицине (обзор литературы) // Молодой ученый. 2015. № 7(87). С. 256–265. [Babadzhanova Z.Kh., Karomatov I.D., Alymova D.K. Sycamine: Application in Ancient, Modern Folk and Scientific Medicine. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 7, pp. 256–265].

2. Бабаханова Х.А., Алимova Х.А. К оценке эффекта применения в бумажных изделиях отходов натурального шелка и кенафа // Науч.-техн. журн. «Шелк». 2000. № 2. С. 20–21. [Babakhanova Kh.A., Alimova Kh.A. To the Assessment of the Effect of Using Natural Silk and Kenaf Waste in Paper Products. *Shelk*, 2000, no. 2, pp. 20–21].

3. Барбаш В.А. Сольволизні варіння целюлози з пшеничної соломки // Наук. вісті НТУУ КПІ. 2002. № 1. С. 119–125 [Barbash V.A. Solvolysis Cooking of Cellulose from Wheat Straw. *Science News of NTUU "KPI"*, 2002, no. 1, pp. 119–125].

4. Барбаш В.А., Безродная С.Е. Использование кенафа в целлюлозно-бумажной промышленности // Эко-технологии и ресурсосбережение. 2002. № 3. С. 39–42. [Barbash V.A., Bezrodnaya S.E. Use of Kenaf in the Pulp and Paper Industry. *Ekotekhnologii i resursoberezhnie* [Ecotechnologies and resource conservation], 2002, no. 3, pp. 39–42].

5. Барбаш В.А., Трембус И.В. Органосольвентный способ получения волокнистых полуфабрикатов из отходов сельского хозяйства // Эко-технологии и ресурсосбережение. 2002. № 6. С. 29–32. [Barbash V.A., Trembus I.V. Organosolvent Method of Obtaining Fibrous Semi-Finished Products from Agricultural Waste. *Ekotekhnologii i resursoberezhnie* [Ecotechnologies and resource conservation], 2002, no. 6, pp. 29–32].

6. Барсуков Е.В. Получение двухслойной кабельной бумаги с электропроводящим полимерным покрытием на основе древесной и джутовой целлюлоз: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2005. 20 с. [Barsukov E.V. *Obtaining a Two-Layered Cable Paper with an Electroconductive Polymer Coating Based on Wood and Jute Cellulose*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Perm, 2005. 20 p.].

7. Дулькин Д.А. Развитие научных основ и совершенствование процессов технологии бумаги и картона из макулатуры: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск.: АГТУ, 2008. 200 с. [Dul'kin D.A. *Development of Scientific Foundations and Processes Improvement of Paper and Cardboard Technology from Waste Paper*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, ASTU, 2008. 200 p.].

8. Железняк И. Древесина шелковицы (тутового дерева) // Деревопром. вестн. ATMWOOD. 28 февраля 2015. [Zhleznyak I. Mulberry Wood. *Derevo-promyshlennyy vestnik ATMWOOD*, 2015].

9. *Ивченко И.С.* Книга о деревьях. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 273 с. [Ivchenko I.S. *A Book about Trees*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 273 p.]
10. *Махотина Л.Г.* Современные тенденции в технологии бумаги для печати // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2008. № 3. С. 52–55. [Mahotina L.G. The Modern Trends in the Technology of Printing Paper Production. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2008, no. 3, pp. 52–55].
11. *Мухамадрасулов Ш.Х.* Повышение эффективности технологии производства натурального шелка // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2015. № 1. С. 216–220. [Muxamadrasulov Sh.X. Improving the Efficiency of Manufacturing Natural Silk. *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX)*, 2015, no. 1, pp. 216–220].
12. Патент № 2249636 Российская Федерация, МПК D21C 5/00, 3/00, D21H 11/1. Способ получения целлюлозной массы из стеблей кукурузы / Х. Рю, Ч.К. Ким, Вон Ж.-М. Опубл. 10.04.2005, Бюл. № 10. 11 с. [Rju Kh., Kim Ch.K., Von Z.-M. *Method of Preparing Pulp from Corn Stems*. Patent RF no. RU 2 249 636 C2, 2005].
13. Патент РУз № IAP 04879. Способ получения целлюлозы / Д.С. Набиев, И.А. Набиева, Х.А. Бабаханова, Ф.Н. Шахидова 2014. [Nabiev D.S., Nabieva I.A., Babahanova H.A., Shahidova F.N. *The Method of Cellulose Production*. Patent UZ no. IAP 04879, 2014].
14. *Пейн М.* Современное состояние и перспективы использования макулатуры в мировом масштабе // Pulp & Paper International. 1997. № 3. С. 34–37. [Peyn M. The Current State and Prospects for the Use of Waste Paper on a Global Scale. *Pulp & Paper International*, 1997, no. 3, pp. 34–37].
15. *Пузырев С.С.* Ресурсосберегающая технология переработки макулатуры // ЛесПромИнформ. 2006. № 3(34). С. 104–109. [Puzyrev S.S. Resource-Saving Waste Paper Recycling Technology. *LesPromInform*, 2006, no. 3 (34), pp. 104–109].
16. Постановление Президента Республики Узбекистан «О дополнительных мерах по развитию глубокой переработки в шелковой отрасли» № ПП-4411 от 31.07.2019. [Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan “On Additional Measures for the Development of Deep Processing in the Silk Industry” No. ПП-4411 dated July 31, 2019].
17. *Розен Б.Я.* Чудесный мир бумаги. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 124 с. [Rozen B.Ya. *The Wonderful World of Paper*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 124 p.]
18. *Савельева Л.Ф.* Целебные растения вокруг нас. Волгоград: Издатель, 2018. 376 с. [Savelyeva L.F. *Healing Plants around Us*. Volgograd, Izdatel Publ., 2018. 376 p.]
19. *Сиегл С.* Производство целлюлозы из соломы, тростника и багассы // Natural pulping update and progress. 2002. С. 237–249. [Siegl S. Pulp Production from Straw, Reed and Bagasse. *Natural pulping update and progress*, 2002, pp. 237–249].
20. *Шерышева Ю.В., Сентюрова Л.Г., Касимова Н.Б.* Краситель из плодов тутового дерева // Междунар. журн. прикладных и фундам. исслед. 2018. № 5(ч. 2). С. 301–305. [Sherysheva Yu.V., Sentyurova L.G., Kasimova N.B. The Dye from the Fruit of the Mulberry Tree. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2018, no. 5(part 2), pp. 301–305].
21. Babahanova H.A. Papier mit Faserabfaellen aus der Textilindustrie. *Textile Problems*, 2003, no. 4, pp. 34–35.
22. *CEPI Sustainability Report*. Brussels, CEPI, 2005. 36 p.
23. Huang G., Chen Z., Zhang C. Aqueous Ammonia-Caustic Potash Pulping of Rice Straw. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2002, iss. 4, pp. 31–36.
24. Lee K.-H., Won J.-M. *Process for Producing Fiber Pulp Utilizing Bamboo and Pulp Produced Using the Same*. Patent KR no. WO 2007/004757 A1, 2007.

25. Smith M.K. Formation Potential of West Coast Kraft Pulps. *Pulp & Paper Canada*, 1986, vol. 87, iss. 10, pp. T387–T394.

CELLULOSE PULP FROM MULBERRY BRANCH BARK FOR THE PAPER INDUSTRY

Kh.A. Babakhanova, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAN-3856-2020](https://orcid.org/0000-0002-6956-2824),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-2824>

Z.K. Galimova, Assistant; ResearcherID: [AAN-2449-2020](https://orcid.org/0000-0003-0958-8579),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0958-8579>

M.M. Abdunazarov, External PhD Student; ResearcherID: [AAN-2711-2020](https://orcid.org/0000-0002-0099-8312),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0099-8312>

I.I. Ismailov, Assistant; ResearcherID: [AAN-2481-2020](https://orcid.org/0000-0003-0864-0056),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0864-0056>

Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Shohjahon str., 5, Tashkent, 100100, Republic of Uzbekistan; e-mail: halima300@inbox.ru, z.galimova8282@mail.ru, abdunazarov.1977@mail.ru, ikromzhon.ismailov@bk.ru

Uzbekistan is bare of forests and it takes the fifth place in the world in terms of cotton production, and the third place in terms of silk production after China and India. According to the government program the expansion of the land area for mulberry plantations boosts the growth of silk production causing an increase in the total amount of wastes, i.e. branches of mulberry trees industrially useless after the removal of leaves. Their use as a raw material for the cellulose pulp production is relevant, since it is aimed at solving not only the resource, but also the environmental problem. The bark was cut off from the mulberry branches and soaked in water for some time after which its exterior hard layer was scraped off and divided into the rough exterior layer and the softer inner layer. The inner layer was boiled for several hours. The boiled bast, after washing with water, was grinded in a laboratory grinding machine under the following conditions: mass concentration – 1 %, temperature – 22 °C. A given amount of lint cotton cellulose (grinding degree – 45 °SR) was added to the grinded bast. Paper molds with the mass of 80 g/m² were obtained in laboratory conditions using a sheet-making apparatus. It was found out that the obtained paper that contains cotton cellulose pulp and inner layer of mulberry branch bark has low whiteness which depends on whiteness of the added fibers. It has been established that adding the cellulose pulp of the inner layer of mulberry branch bark at a grinding degree of 30 °SR contributes to the production of strong paper. It is recommended to add up to 30 % of cellulose pulp from the inner layer of mulberry branch bark to paper pulp as further addition adversely affects the paper whiteness.

For citation: Babakhanova Kh.A., Galimova Z.K., Abdunazarov M.M., Ismailov I.I. Cellulose Pulp from Mulberry Branch Bark for the Paper Industry. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 193–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-193-200

Keywords: cellulose pulp, mulberry branch bark, grinding degree, paper, whiteness, breaking load, breaking length, bending resistance.

Поступила 16.01.20 / Received on January 16, 2020



УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-201-210

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ЛЕСОКУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ЛЕСОВОДА К.Ф. ТЮРМЕРА

М.Д. Мерзленко, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: J-1359-2016,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., Россия, 143030; e-mail: md.merzlenko@mail.ru

Библиография научных статей по лесохозяйственной деятельности известного лесовода К.Ф. Тюрмера насчитывает более 150 наименований, в том числе автора статьи – более 20. В настоящее время в центре Русской равнины сохранилось почти 2000 га его посадок. Целью данной статьи является подведение итогов лесокультурной деятельности К.Ф. Тюрмера. Результаты такого изучения свидетельствуют о соблюдении им принципа соответствия хвойных древесных пород лесорастительным условиям в сочетании с оптимальными схемами их смешения и размещения посадочных мест. Многолетнее изучение лесных культур К.Ф. Тюрмера показало, что в богатых лесорастительных условиях коренных ельников наиболее перспективно создание сосново-еловых культур, которые при составе 7С3Е в 100 лет дают 800 м³ стволовой древесины на 1 га. Очень высокие результаты выявлены при интродукции лиственницы европейской, которая в лесных культурах в сочетании с елью в спелом возрасте способна давать 1000 м³ и более стволовой древесины на 1 га. Фактически К.Ф. Тюрмер осуществлял принцип плантационного лесоводства, позволяющего существенно увеличивать лесоводственный эффект и снижать возраст рубки насаждений с целью получения деловой хвойной древесины.

Для цитирования: Мерзленко М.Д. Основные итоги лесокультурного наследия лесовода К.Ф. Тюрмера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 201–210. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-201-210

Ключевые слова: лесные культуры, хвойные древесные породы, производительность насаждений, распад древостоев.

Введение

В преддверии предстоящего 200-летнего юбилея со дня рождения известного лесовода-классика Карла Францевича Тюрмера, автор статьи счел нужным подвести итоги его плодотворной лесокультурной деятельности. Упуская биографические данные и приемы его лесохозяйственной практики, которые всесторонне и досконально изложены во многочисленных публикациях [2, 12, 19, 21, 24, 25 и др.], следует сказать, что он стал широко известен не только благодаря его блестящим успехам в области лесокультурного дела.

Это, прежде всего, передовой уровень ведения лесного хозяйства, который выразился в культуре воплощения высочайших лесоводственных знаний, базировавшихся на синтезе теории и практики. Справедливо отмечается [13, 22, 23], что в заслугу К.Ф. Тюрмера надо причислить принципы осуществле-

ния рационального лесного хозяйства, которые состояли из элементов непрерывного лесоустройства и организации эксплуатационного направления по удовлетворению потребности в деловой древесине. В основу использования лесных ресурсов был положен принцип «постоянства и равномерности» пользования лесом. Важное значение придавалось рубкам ухода, причем не только с целью получения дополнительного дохода, а для правильного выращивания (воспитания) хвойных насаждений. Режим уходов состоял в частых и интенсивных разреживаниях. Так, в культурах до 30–33-летнего возраста он проводил от 2 до 6-и приемов рубок ухода, причем запас стволовой древесины составлял до 200 м³/га. При этом уход осуществлялся по низовому методу, и было взято до 150 м³/га, т. е. общая производительность составила 350 м³/га. Проводя столь интенсивный уход, К.Ф. Тюрмер считал желательным, чтобы насаждения до 60-и лет были сомкнутыми [19].

В основу лесовыращивания К.Ф. Тюрмер положил фактически принцип плантационного лесного хозяйства [7, 23]: создание за сравнительно короткий период (возраст рубки был принят в 60 лет, со временем повышен им до 80 лет) высокопродуктивных и хозяйственно ценных хвойных древостоев. Все созданные им насаждения – это хвойные лесные культуры, как чистые по составу, так и смешанные, но исключительно состоящие из сочетания разных хвойных пород (рис. 1 и 2).

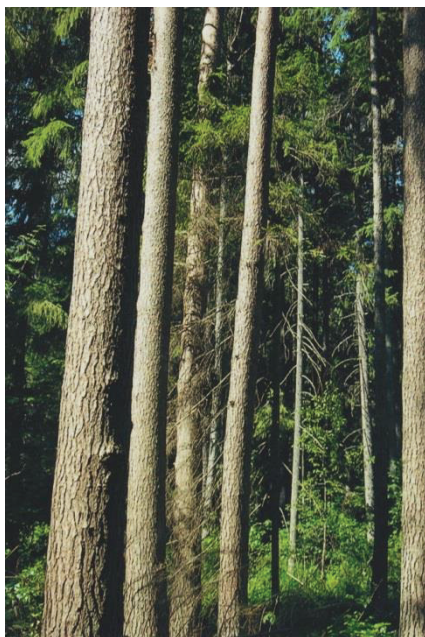


Рис. 1. Порецкий лесной массив. Хвойные культуры с преобладанием сосны обыкновенной. Фото М.Д. Мерзленко, 2010 г.

Fig. 1. Poretskiy forest. Coniferous crops with a predominance of Scots pine. Photo by M.D. Merzlenko, 2010



Рис. 2. Порецкий лесной массив. Высокопродуктивное насаждение с преобладанием лиственницы европейской. Фото Н.А. Бабича, 2012 г.

Fig. 2. Poretskiy forest. High-yield planting with a predominance of European larch. Photo by N.A. Babich, 2012

Объекты и методы исследования

По данным лесоустройств к XXI в. сохранилось 2337,3 га тюрмеровских лесокультур, из которых только 22 % приходилось на чистые по составу насаждения с преобладанием посадок сосны; 78 % – это смешанные хвойные насаждения из сосны и ели, а также лиственницы европейской с сосной обыкновенной, с елью европейской и, очень редко, – с пихтой сибирской. Все ныне сохранившиеся тюрмеровские лесокультуры произрастают в Московской и Владимирской областях и, в небольшом количестве, – в Калужской области.

Относительно тюрмеровских лесных культур как объекта исследований необходимо отметить, что когда им миновало 60 и тем более 80 лет, насаждения не поступили в главную рубку, а продолжали расти. При этом они по факту никогда после К.Ф. Тюрмера не обладали, как это нередко считается, особым статусом заповедного режима. Чтобы развеять этот миф заповедности, следует сказать, что все насаждения не только выращивались в XX в. с соблюдением обычных лесохозяйственных мероприятий, но и наряду с этим подвергались крайне негативным воздействиям. К ним надо причислить рубки военного времени, включая устройство землянок, и, особенно, неоднократно проводимые с 70-х гг. чрезмерные проходные и выборочные санитарные рубки, носившие на деле характер подневольно-выборочных рубок. Для восстановления текущего прироста по запасу до исходного состояния понадобилось от 20 до 30 лет. Так как вырубалась в основном сосна, значительные площади сосново-еловых культур к концу XX в. превратились в елово-сосновые насаждения.

Автор занимался изучением лесных культур К.Ф. Тюрмера на протяжении полувека (с 1969 г.). Основой исследований являлся статистический метод, заключающийся в научных работах на постоянных пробных площадях (ППП). Одновременно с ним широко применялся статико-динамический метод, основанный на спорадических обследованиях лесных культур разного возраста [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Так как К.Ф. Тюрмером была четко поставлена цель выращивания хвойных искусственных насаждений для получения деловой древесины, в статье показаны потенциальные возможности этого целевого направления и затрагиваются вопросы устойчивости искусственных древостоев. При этом надо учитывать, что лесные культуры К.Ф. Тюрмера давно перешагнули возраст рубки, который был намечен изначально. Да и сами тюрмеровские лесокультуры в XX в. неоднократно переживали стрессовые состояния из-за чрезмерно интенсивных рубок промежуточного пользования.

В табл. 1 приведены образцы хвойных искусственных насаждений К.Ф. Тюрмера. Все они создавались методом рядовой посадки. Подавляющая часть лесных культур относится к условиям коренных ельников, соответствующих кисличному типу леса, и произрастает на территории Смоленско-Московской возвышенности. Полной противоположностью этому являются объекты во Владимирской области (ППП: АА-2, АА-9, Г-67, АА-5), соответствующие типично сосновым условиям супесчаных и песчаных почв, подстилаемых известняками и доломитами.

Таблица 1

Образцы некоторых хвойных лесных культур К.Ф. Тюрмера

Шифр пробной площади	Тип леса	Возраст культур, лет	Состав	Ярус	Средние		Класс бонитета	Густота стояния, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Запас ствольной древесины, м ³ /га											
					Н, м	Д, см															
Г-129	Ельник кисличник	98	10Е	1	32,8	28,6	Ia	673	45,9	656											
											О-6	Сосняк кисличник	90	10С	1	31,9	30,5	Ia	416	37,6	580
Г-127	Сосняк кисличник	104	8С	1	32,8	34,1	Ia	379	36,0	512											
											104	2Е	1	28,4	30,7	I	104	8,1	111		
																				10Е	2
											Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:		
																				79	10С
АА-2	Сосняк черничник свежий	70	10С	1	25,5	27,2	I	620	36,4	453											
											78	10С	1	25,5	24,9	I	646	32,7	388		
																				77	10С
											Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:		
																				111	10Л
4Т	Листвяг кисличник	156	10Е	2	19,4	19,2	Ia	144	4,1	39											
											156	+Е	1	34,8	39,8	Ia	275	69,9	1290		
Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:													
									2	17,0	16,9	209	4,7	40							
Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:	Итого:																
						500	76,6	1362													

Все чистые по поставу ельники фактически были представлены высокопродуктивными монокультурами. Одним из примеров таких насаждений является ППП Г-129, где в возрасте 98 лет запас стволовой древесины составил $656 \text{ м}^3/\text{га}$ (табл. 1). Столь же высокая производительность ($637 \text{ м}^3/\text{га}$) отмечена в 67-летних культурах Тюрмеровского лесничества Калужской области [4], которые представляли собой эталонное насаждение. Однако чистые по составу ельники недолговечны: как культуры, так и естественные древостои подвержены усыханию после засух [9, 15], последствия которых проявляются в виде короедников. Как правило, усыхание затрагивает древостои V и старше классов возраста. Недаром К.Ф. Тюрмер за максимальный возраст рубки принимал 80 лет. За этот же возраст рубки ельников (начиная с 81 года) ратовал и акад. Н.П. Анучин, что вполне обосновано, ибо в зоне смешанных лесов текущий прирост по запасу стволовой древесины у искусственных ельников, созданных сеянцами, становится отрицательным с 95 лет, а саженцами – с 75 лет [6]. Использование крупного посадочного материала делает лесные культуры более скороспелыми.

Более долговечными и устойчивыми являются искусственные сосняки как чистые по составу (рис. 1), так и смешанные сосново-еловые культуры с преобладанием сосны в составе (табл. 1). Наивысшей производительности достигают культуры сосны в кисличном типе леса, т. е. в богатых «еловых» лесорастительных условиях с суглинистыми почвами на породах тяжелого гранулометрического состава. Там они характеризуются почти одинаковыми с культурами ели запасами древесины, но при этом дают древесину с более высокими физико-механическими свойствами и имеют больший выход пиловочника (на 20 %) по сравнению с культурами ели [5, 9].

На Смоленско-Московской возвышенности в лесных культурах К.Ф. Тюрмера в условиях коренных ельников-кисличников всегда преобладали смешанные посадки сосны и ели. Причем оптимальным оказался состав 7С3Е, при котором модальные сосново-еловые насаждения в 100 лет наращивают до $800 \text{ м}^3/\text{га}$ стволовой древесины (рис. 3). Культуры по строению полога имеют явное преобладание сосны, а ель образует сложной формы полог, не имеющий четко выраженной ярусности. Часто во второй ярус выходит даже ель из подроста естественного происхождения. В лесных культурах такого состава

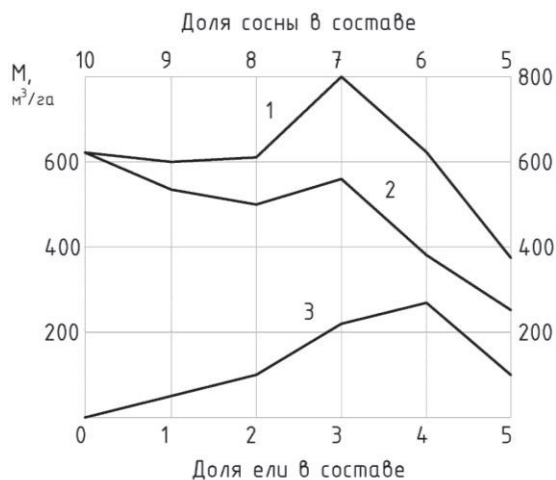


Рис. 3. Запас (M) компонентных пород в 100-летних смешанных культурах из сосны и ели: 1 – общий запас, 2 – запас сосны, 3 – запас ели

Fig. 3. Stock of component species in 100-year old mixed crops of pine and spruce: 1 – total stock, 2 – pine stock, 3 – spruce stock

стволы сосны и ели в 100 лет часто достигают наиболее крупных размеров: средняя высота сосны составляет 33 м, ели – 31 м; средний диаметр сосны 39 см, ели – 32 см. Данные древостои сформировались из посадок, созданных изначально по такому типу лесных культур: 1 ряд сосны, 2 ряда ели, размещение посадочных мест $2,4 \times 1,0$ м; 1 ряд сосны, 1 ряд ели, размещение посадочных мест $3,0 \times 1,5$ м. Создавая смешанные лесокультуры из сосны и ели, К.Ф. Тюрмер не признавал их совместного произрастания с лиственными породами. По его мнению [18], наличие, например, осины в лесах считалось признаком дурного хозяйства. Насколько даже изначально незначительная естественная примесь лиственных уменьшает запасы древесины в хвойных культурах показано в работе М.В. Рубцова и М.Д. Мерзленко [12], согласно которой по данным массовой таксации незначительная примесь березы способна снизить запас сосново-еловых лесных культур на 20...30 %.

Из всех хвойных пород самой высокопроизводительной хвойной породой в лесных культурах [11, 16–18, 20] оказалась лиственница европейская судетской формы (*Larix decidua* Mill. *Sudetica*). Такая же тенденция помимо Поречья свойственна и насаждениям лиственницы европейской судетской формы в Никольской лесной даче Московской области с легкосуглинистыми почвами на флювиогляциальных отложениях [9]. Следует отметить, что результаты выращивания лиственницы европейской в тюрмеровских культурах Смоленско-Московской возвышенности и Владимирской области, а также в созданных лесоводом Готтгреем в Никольской лесной даче, несмотря на разные почвенные условия, но при наличии очень хорошей дренированности, свидетельствуют о почти одинаковых показателях их производительности [7, 8, 11]. Она может достигать $1000 \text{ м}^3/\text{га}$ и более (рис. 3, табл. 1).

В табл. 1 представлены два эталонных участка культур лиственницы (ППП К-4 и 4Т). Насаждение на ППП К-4 отражает очень высокую производительность. Вызвана она эффектом рельефа, ибо участок расположен на западном склоне коренного берега ручья с уклоном склона 20° , а также повышенной густотой. Фактически наличие столь высокого запаса ($1512 \text{ м}^3/\text{га}$) является «потолком» производительности для насаждений лиственницы европейской в центре Русской равнины. С повышением возраста этого насаждения запас древесины существенно не увеличился, так как пошел отпад стволов из-за процесса естественного изреживания перегущенного насаждения. Для дальнейшего успешного продуцирования насаждения лиственницы густота стояния в 110 лет должна быть как минимум в 2,5 раза меньше. На это четко указывает составленная А.Н. Поляковым [10] таблица хода роста культур лиственницы европейской, созданных К.Ф. Тюрмером.

Опыт тюрмеровских лесных культур лиственницы свидетельствует, что самым эффективным с лесоводственно-биологических позиций приемом является изначальная посадка лиственницы с елью, где ряд лиственницы чередуется с рядом ели (табл. 1, ППП 4Т). Последняя выполняет роль наилучшей сопутствующей породы к лиственнице [1, 16, 18, 20]. В противоположность ели, как породе сопутствующей, сосна обыкновенная является несовместимым компонентом [1, 8, 9, 14, 20]. Взаимодействие этих двух светолюбивых и быстрорастущих хвойных пород в возрастной динамике претерпевает сложные биоценологические взаимоотношения (рис. 4). Изначально обе хвойные породы стремятся занять одну и ту же экологическую нишу в виде господствующего полога. Однако если сначала преимущество в росте наблюдается у

сосны (по высоте – до 40 лет, по диаметру – до 50 лет), то в итоге межвидовой борьбы господствующее положение переходит к лиственнице, окончательно занимающей лидирующее положение в верхнем пологе в V классе возраста. В возрасте от 90 до 120 лет у лиственницы европейской наблюдается резкое увеличение энергии роста по высоте (H) и диаметру (D). При всем этом происходит значительная элиминация деревьев сосны, в результате чего к 150 годам сосна в составе занимает в среднем 2,6 %, тогда как изначально доля каждой из пород в составе была по 50 %.

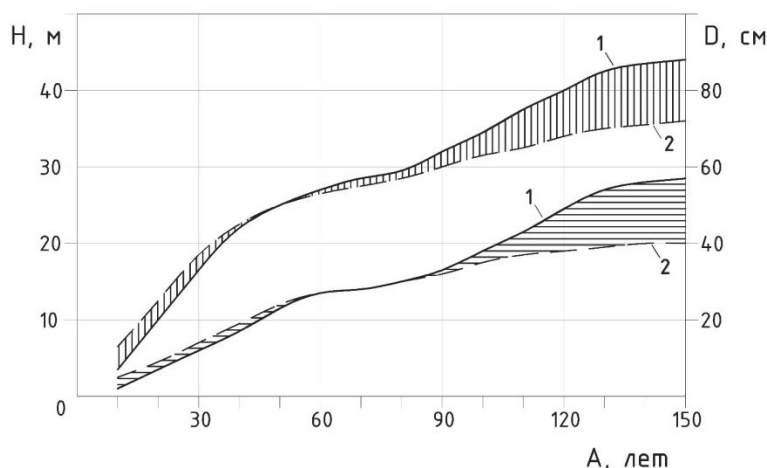


Рис. 4. Рост лиственницы и сосны в смешанных культурах (A – возраст) (вертикальная штриховка – разрыв по высоте, горизонтальная – по диаметру): 1 – лиственница; 2 – сосна

Fig. 4. Growth of larch and pine in mixed crops (vertical hatching – gap in height, horizontal hatching – gap in diameter): 1 – larch; 2 – pine

В естественных древостоях Средней Европы лиственница европейская – это горная древесная порода, не образующая, как правило, чистых по составу древостоев и доживающая до 500 лет. В отношении лесных культур лиственницы европейской, интродуцированной в центр Русской равнины, можно говорить об их скороспелости и даже относительной недолговечности. Доказательством этого служат наши данные о ходе возрастной дигрессии (табл. 2).

Таблица 2

Ход возрастной дигрессии в лесных культурах лиственницы европейской

Возраст культур, лет	Таксационные показатели			
	Густота стояния, шт./га	Текущий отпад стволов в год, шт./га	Запас стволовой древесины, м ³ /га	Текущий прирост по запасу в год, м ³ /га
100	325	1,3	716	11,4
120	299		944	
140	261	1,9	1096	7,6
150	226	3,5	1119	2,3

Они свидетельствуют, что от 100 до 150 лет отпад по числу стволов увеличился в 2,7 раза, а среднепериодический текущий прирост по запасу стволовой древесины уменьшился в 5 раз. В лесных культурах сосны обыкновенной как Поречья, так и Лосиногостовского Острова и Никольской лесной дачи этой резкой возрастной тенденции нет [8], что может говорить об их большей долговечности.

Несмотря на то, что в целом по объектам тюрмеровских насаждений лиственницы европейской за возрастной период от 140 до 150 лет запас увеличился на 23 м³/га (табл. 2), на ряде участков идет распад древостоев. Вызван он разрушительной деятельностью трутовика Швейница. Этот фитопатоген паразитирует на корнях лиственницы европейской в большей степени, нежели на сосне. Загнивание корней способствует интенсивной ветровальности при ураганных ветрах. Причем наиболее значительному ветровалу подвержены участки, расположенные на возвышенных элементах рельефа. Таким образом распад затронул ППП 1Рд, 4Т, 6Т в урочище «Пустошь» (Поречье Уваровского района Московской области). Следует отметить, что комлевая гниль, вызываемая трутовиком Швейница, в 140-летних культурах лиственницы европейской занимает не более 4 % площади поперечного сечения среза ствола на высоте пня [11].

Заключение

Успешность тюрмеровских лесокультур изначально была обусловлена тремя основополагающими составляющими [19]: 1 – качественным посадочным материалом; 2 – высоким агротехническим фоном при закладке лесных культур; 3 – частыми рубками ухода по низовому методу, не снижающими общей сомкнутости искусственных насаждений.

Правильное воплощение типа лесных культур (схем смешения и размещения компонентных пород) в соответствии с типом условий местопроизрастания способствовало интенсивному росту искусственных насаждений. Из аборигенных древесных пород наибольшей производительностью обладают 100-летние лесные культуры, созданные посадкой сосны и ели, при составе 7С3Е. Сверхвысокую производительность имели насаждения из интродуцированной лиственницы европейской и ели местного происхождения, способные в спелом возрасте давать 1000 м³ и более стволовой древесины на 1 га.

При жизни К.Ф. Тюрмера и его прямых последователей все ведение лесного хозяйства в области лесокультурного дела осуществлялось как высокоинтенсивное плантационное лесоводство. Впоследствии оно велось как обычное лесохозяйственное производство с осуществлением проходных и санитарных рубок и при значительном повышении возраста главной рубки.

Несмотря на то, что созданные К.Ф. Тюрмером лесные культуры значительно перешагнули возраст главной рубки (80 лет), можно констатировать факт выращивания скороспелых рукотворных лесов, успешно выполняющих целевое назначение по получению ценной хвойной древесины. При условии тюрмеровского, по сути плантационного, хозяйства возраст рубки в зоне смешанных лесов для ели может не превышать 80 лет, для лиственницы – 120 лет, для сосны – 140 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Васильев Я.Я. Насаждения лиственницы европейской в Поречье Уваровского района Московской области // Тр. Ботан. ин-та им. В.Л. Комарова. М.: Изд-во АН СССР, 1950. Сер. VI. Вып. I. С. 510–545. [Vasil'yev Ya.Ya. Plantings of European Larch

in Porechye, Uvarovsky District, Moscow Region. *Transactions of the Botanical Institute named after V.L. Komarov*. Moscow, AN SSSR Publ., 1950, ser. VI, iss. I, pp. 510–545].

2. Исаченко Х.М. Опыт лесоразведения в центральных областях европейской части СССР. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1947. 112 с. [Isachenko Kh.M. *Forestation Experience in the Central Regions of the European Part of the USSR*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1947. 112 p.].

3. Кобранов Н.П. Обследование и исследование лесных культур // Тр. по лесн. опытно-делу. Вып. VIII. Л., 1930. С. 1–102. [Kobranov N.P. *Inspection and Study of Forest Crops. Transactions on Forest Experimentation Activity*. Iss. VIII. Leningrad, 1930, pp. 1–102].

4. Мерзленко М.Д. Культуры ели К.Ф. Тюрмера на территории Смоленско-Московской возвышенности // Изв. вузов. Лесн. журн. 1974. № 2. С. 15–18. [Merzlenko M.D. K.F. Turmer's Spruce Plantations on the Territory of the Smolensk–Moscow Upland. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1974, no. 2, pp. 15–18]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1974/9Bdf.pdf>

5. Мерзленко М.Д. Сравнительный анализ роста чистых культур сосны и ели на суглинистых почвах // Лесоведение. 1987. № 2. С. 36–42. [Merzlenko M.D. A Comparative Analysis of the Growth of Pure Pine and Spruce Crops on Loam Soils. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1987, no. 2, pp. 36–42].

6. Мерзленко М.Д. К вопросу распада искусственных насаждений ели // Науч. тр. МЛТИ. № 234. М.: МЛТИ, 1990. С. 79–82. [Merzlenko M.D. On the Issue of Decline of Artificial Plantations of Spruce. *Transactions of MLTI*. No. 234. Moscow, MLTI Publ., 1990, pp. 79–82].

7. Мерзленко М.Д. Рукотворный лес К.Ф. Тюрмера. М.: Госкомлес СССР, 1991. 27 с. [Merzlenko M.D. *Artificial Forest by K.F. Turmer*. Moscow, Goskomles SSSR Publ., 1991. 27 p.].

8. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Опыт лесоводственного мониторинга в Никольской лесной даче. М.: МГУЛ, 2015. 112 с. [Merzlenko M.D., Melnik P.G. *Experience of Silvicultural Monitoring in Nicholskaya Lesnaya Dacha*. Moscow, MGUL Publ., 2015. 112 p.].

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

10. Поляков А.Н., Ипатов Л.Ф., Успенский В.В. Продуктивность лесных культур. М.: Агропромиздат, 1986. 240 с. [Polyakov A.N., Ipatov L.F., Uspenskiy V.V. *Forest Crops Productivity*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 240 p.].

11. Рубцов М.В., Мерзленко М.Д. Лесные культуры К.Ф. Тюрмера. М.: ЦБНТИ-лесхоз, 1975. 42 с. [Rubtsov M.V., Merzlenko M.D. *Forest Crops of K.F. Turmer*. Moscow, TsBNTIleskhoz Publ., 1975. 42 p.].

12. Рубцов М.В., Глазунов Ю.Б., Николаев Д.К. Лиственница европейская в центре Русской равнины // Лесн. хоз-во. 2011. № 5. С. 26–29. [Rubtsov M.V., Glazunov Yu.B., Nikolayev D.K. European Larch in the Center of the Russian Plain. *Lesnoye khozyaystvo*, 2011, no. 5, pp. 26–29].

13. Рубцов М.В., Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Николаев Д.К. Лесоводственная экскурсия в тюрмеровские леса Поречья. М.: ИЛАН РАН, 1998. 35 с. [Rubtsov M.V., Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B., Nikolayev D.K. *Silvicultural Excursion to the Turmer Forests of Porechye*. Moscow, ILAN Publ., 1998. 35 p.].

14. Рудзкий А.Ф. Исследования прироста в Порецкой даче // Лесн. журн. 1878. Вып. X. С. 543–572. [Rudzkiy A.F. Growth Studies in Poretskaya Dacha. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1878, no. X, pp. 543–572].

15. Тимофеев В.П. Борьба с усыханием ели. М.: Гослестехиздат, 1944. 48 с. [Timofeyev V.P. *Fight against Spruce Drying out*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1944. 48 p.].

16. Тимофеев В.П. Роль лиственницы в поднятии продуктивности лесов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 160 с. [Timofeyev V.P. *The Role of Larch in Raising Forest Productivity*. Moscow, AN SSSR Publ., 1961. 160 p.].

17. Тимофеев В.П. Опыт выращивания лиственницы европейской в Московской и соседних областях // Лесн. хоз-во. 1971. № 12. С. 21–27. [Timofeyev V.P. The Experience of Growing European Larch in the Moscow and Neighboring Regions. *Lesnoye khozyaystvo*, 1971, no. 12, pp. 21–27].

18. Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с. [Timofeev V.P. *Forest Crops of Larch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 216 p.].

19. Тюрмер К.Ф. Пятьдесят лет лесохозяйственной практики. М.: Тип. Э. Лисспера и Ю. Романова, 1891. 186 с. [Turmer K.F. *Fifty Years of Forestry Practice*. Moscow, Типография Е. Лисспера и Ю. Романова, 1891. 186 p.].

20. Яблоков А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М.: Гослестехиздат, 1934. 127 с. [Yablokov A.S. *Larch Culture and Planting Care*. Moscow, Gosl'estekhizdat Publ., 1934. 127 p.].

21. Guse. Eine deutsche Forstwirtschaft in Russland. *Allgemeine Forst und Jagd Zeitung* [German Journal of Forest Research], 1982, B. VII, S. 242–245.

22. Pfalz W. Die Europäische Lärche in Zentrum der Russischen Tiefebene. *AFZ – der Wald*, 2014, N. 3, S. 23–25.

23. Rubtsov M.V. Contribution of K.F. Turmer into Forestry. *Selected Works of K.F. Turmer*. Moscow, MGUL Publ., 2001, pp. 7–27.

24. Thürmer K. Bewirtschaftung der Privatwaldungen. *Allgemeine Forst und Jagd Zeitung* [German Journal of Forest Research], 1877, B. XI, S. 385–391.

25. Thürmer K. Die Forstwirtschaft in Russland. *Allgemeine Forst und Jagd Zeitung* [German Journal of Forest Research], 1882, B. XII, S. 420–424.

THE MAJOR RESULTS OF THE SILVICULTURAL HERITAGE OF THE FORESTER K.F. TURMER

M.D. Merzlenko, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation; e-mail: md.merzlenko@mail.ru

Bibliography of academic papers on forestry activities of the well-known forester K.F. Turmer has more than 150 titles, including papers by the author of this article (more than 20). Today, almost 2,000 ha of his plantings have been preserved in the center of the Russian Plain. The purpose of the article is to summarize the silvicultural heritage of K.F. Turmer. The results of this study indicate the compliance with the conformity principle of conifers with forest site conditions along with optimal patterns of their mixing and placement of planting points. The results of a long-term study of the K.F. Turmer's forest crops showed that in rich forest site conditions of indigenous spruce forests the creation of pine-spruce plantations is the most promising. The plantations in composition of 7 Scots pines (*Pinus sylvestris*) and 3 Norway spruces (*Picea abies*) in 100 years produce 800 m³ of trunk wood per 1 ha. The introduction of European larch has shown very good results. In forest crops it is capable to produce 1,000 or more m³ of trunk wood per 1 ha in combination with ripe spruce. Indeed K.F. Turmer implemented the principle of plantation forestry, which allows significantly increasing the silvicultural effect and reducing the age of felling in order to obtain commercial coniferous wood.

For citation: Merzlenko M.D. The Major Results of the Silvicultural Heritage of the Forester K.F. Turmer. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 201–210. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-201-210

Keywords: forest crops, coniferous tree species, productivity of plantings, decay of forest stands.

Поступила 07.12.19 / Received on December 7, 2019