

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

6

2022

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

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

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

6

2022

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Б.В. Раевский, Р.В. Игнатенко, Е.В. Новичонок, В.М. Прокопюк, К.К. Куклина* Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород..... 9
- В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, И.М. Данилин.* Разработка модели биомассы *Picea L.* и *Abies L.* для региональных условий Евразии..... 38
- А.В. Кабонен, О.И. Гаврилова, И.Т. Кищенко.* Цифровое сканирование роста и развития древесных растений..... 55
- О.Н. Тюкавина, Л.Ф. Попова.* Корневая система тополя бальзамического (*Populus balsamifera L.*)..... 71
- С.С. Макаров, М.Т. Упадышев, И.Б. Кузнецова, А.В. Заушишцена, Е.И. Куликова, Е.А. Сурина.* Применение освещения различного спектрального диапазона при клональном микроразмножении лесных ягодных растений..... 82
- И.С. Коновалова, Д.Ю. Коновалов.* Эколого-ценотическая активность видов среднетаежной флоры..... 94
- В.В. Тужилкина.* Функциональная характеристика хвои подроста ели сибирской под пологом и на вырубке ельника черничного в подзоне средней тайги..... 107
- Б.Г. Алиев, В.М. Мамедалиева.* Состояние лесных массивов на насыщенных оксидами железа почвах Азербайджана..... 117

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- Э.Ф. Герц, А.В. Мехренцев, Н.Н. Теринов, А.Ф. Уразова.* Обоснование технологических параметров процесса трелевки древесины мини-трактором при проходных рубках..... 126
- Е.А. Питухин, С.С. Rogozin.* Оптимизация режимов работы лесопожарной машины..... 139

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- Д.С. Русаков, Г.С. Варанкина, А.Н. Чубинский.* Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной..... 153

- В.И. Федюков, В.Ю. Чернов, М.С. Чернова, О.В. Цой.* Резонансные акустические и колориметрические характеристики древесины из ретросооружений..... 164

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

- Е.В. Старжинская, А.М. Кряжев, С.И. Третьяков, А.А. Глуханов.* Выделение сульфатного мыла из щелоков от варки смешанных пород древесины..... 178

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- Н.А. Неверов, З.Б. Чистова, А.Л. Минеев.* Радиальный рост сосны обыкновенной в условиях северной тайги..... 193
- Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2022 г..... 206
-



CONTENTS

FORESTRY

- B.V. Raevsky, R.V. Ignatenko, E.V. Novichonok, V.M. Prokopiuk, K.K. Kuklina.* The Current State of Conifer Species Breeding and Seed Production..... 9
- V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordey, I.M. Danilin.* Designing a Model of the *Picea* L. and *Abies* L. Biomass for Regional Climatic Conditions in Eurasia..... 38
- A.V. Kabonen, O.I. Gavrilova, I.T. Kishchenko.* Digital Scanning of Woody Plant Growth and Development..... 55
- O.N. Tyukavina, L.F. Popova.* Root System of Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.)..... 71
- S.S. Makarov, M.T. Upadyshev, I.B. Kuznetsova, A.V. Zaushintsena, E.I. Kulikova, E.A. Surina.* The Use of Lighting of Various Spectral Ranges for Clonal Micropropagation of Forest Berry Plants..... 82
- I.S. Konovalova, D.Yu. Konovalov.* Ecological and Cenotic Activity of Species of the Middle Taiga Flora..... 94
- V.V. Tuzhilkina.* Functional Characteristics of Siberian Spruce Undergrowth Needles under the Canopy and in the Cutting of Bilberry Spruce Forest in the Middle Taiga Subzone..... 107
- B.G. Aliyev, V.M. Mamedaliyeva.* The State of Forests Growing on Iron Oxide-Saturated Soils of Azerbaijan..... 117

LOGGING TECHNOLOGIES

- E.F. Gerts, A.V. Mekhrentsev, N.N. Terinov, A.F. Urazova.* Substantiation of the Technological Process Parameters of Wood Skidding with a Mini Tractor in Increment Thinning..... 126
- E.A. Pitukhin, S.S. Rogozin.* Optimizing the Forest Firefighting Vehicle Operation Modes..... 139

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- D.S. Rusakov, G.S. Varankina, A.N. Chubinsky.* Theoretical and Experimental Substantiation of the Nature of Interaction between Modified Binders and Wood..... 153

- V.I. Fedyukov, V.Yu. Chernov, M.S. Chernova, O.V. Tsoy. Resonance Acoustic and Colorimetric Characteristics of Wood in Old Structures.....* 164

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

- E.V. Starzhinskaya, A.M. Kryazhev, S.I. Tret'yakov, A.A. Gluhanov. Sulphate Soap Separation from Wood Mixture Cooking Black Liquor.....* 178

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- N.A. Neverov, Z.B. Chistova, A.L. Mineev. Radial Growth of Scots Pine in the Northern Taiga.....* 193

- Index of Articles Published in the Russian Forestry Journal in 2022.....* 206
-



Обзорная статья

УДК 630*233(470.1/.2)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-9-37

Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород

Б.В. Раевский^{1,2}✉, *д-р с.-х. наук; ResearcherID: K-6424-2018,*

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

Р.В. Игнатенко², *канд. биол. наук; ResearcherID: A-7616-2019,*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9608-9465>

Е.В. Новичонко^{1,2}, *канд. биол. наук; ResearcherID: J-4819-2018,*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3676-9869>

В.М. Прокопюк², *аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-3230>*

К.К. Куклина², *аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5567-9549>*

¹Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; raevsky@krc.karelia.ru✉, enovichonok@inbox.ru

²Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; raevsky@krc.karelia.ru, ocean-9@mail.ru, enovichonok@inbox.ru, viktorija_pro@krc.karelia.ru, kuklinovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.20 / Одобрена после рецензирования 24.03.21 / Принята к печати 25.03.21

Аннотация. Проанализирована и обобщена информация по селекции и селекционному семеноводству основных лесообразующих и важных в коммерческом отношении для стран Северной Европы и России пород: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) N. Karst). Показано, что в таких странах, как Швеция и Финляндия, за последние 40–50 лет полностью завершён первый (начальный) цикл плюсовой селекции и активно осуществляются работы второго цикла. В аспекте селекционного семеноводства это означает постепенную замену лесосеменных плантаций I порядка на лесосеменные плантации повышенной генетической ценности – I,5 и II порядков. К середине XXI столетия прогнозируется повышение продуктивности вновь создаваемых искусственных древостоев по запасу стволовой древесины на 20–25 % за счёт селекционной работы. В европейской части России в последней трети XX столетия начат первый цикл плюсовой селекции, который, к сожалению, не был завершён. Однако проведены успешные и местами достаточно масштабные работы по фенотипическому отбору в естественных насаждениях плюсовых деревьев и закладке лесосеменных плантаций I порядка, сформирована селекционная популяция I. Последнее позволяет заложить необходимые площади мультипликационных популяций повышенной генетической ценности – лесосеменные плантации I,5 порядка. Хотя достичь этого во многих субъектах Северо-Западного федерального округа невозможно по причине недостаточного количества отобранных плюсовых деревьев, а главное – крайне малой площади испытательных культур. В настоящее время подавляющее большинство первоначально отобранных плюсовых деревьев остаются не проверенными по потомству, что блокирует возможность дальнейшего развития системы плюсовой селекции. В России также отсутствует специальное селекционное районирование основных лесообразующих пород, обеспечивающее пространственную организацию проведения селекционных работ и использования семян с лесосеменных плантаций. Для достижения

© Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонко Е.В., Прокопюк В.М., Куклина К.К., 2022

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

прогресса в данном направлении необходимо разработать федеральную программу по сохранению и рациональному использованию лесных генетических ресурсов РФ в совокупности с рядом подпрограмм по генетическим исследованиям и селекции важнейших видов-лесообразователей с учетом современных достижений в области молекулярной генетики и биотехнологии.

Ключевые слова: лесная селекция, лесосеменные плантации, испытательные культуры, селекционное семеноводство, плюсовые деревья, лесная селекция в Швеции, лесная селекция в Финляндии, лесная селекция в России, Северо-Западный федеральный округ, *Pinus sylvestris*, *Picea abies*

Благодарности: Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ИЛ и ОКНИ КарНЦ РАН при частичной поддержке НОЦ «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

Для цитирования: Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонко Е.В., Прокопюк В.М., Куклина К.К. Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 9–37. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-9-37>

Review article

The Current State of Conifer Species Breeding and Seed Production

Boris V. Raevsky^{1,2✉}, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [K-6424-2018](https://orcid.org/0000-0002-1315-8937),

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

Roman V. Ignatenko², Candidate of Biology; ResearcherID: [A-7616-2019](https://orcid.org/0000-0001-9608-9465),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9608-9465>

Elena V. Novichonok^{1,2}, Candidate of Biology; ResearcherID: [J-4819-2018](https://orcid.org/0000-0003-3676-9869),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3676-9869>

Victoria M. Prokopiuk², Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-3230>

Kira K. Kuklina², Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5567-9549>

¹Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185000, Russian Federation; raevsky@krc.karelia.ru ✉, enovichonok@inbox.ru

²Department of Multidisciplinary Scientific Research of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185000, Russian Federation; raevsky@krc.karelia.ru, ocean-9@mail.ru, enovichonok@inbox.ru, viktoria_pro@krc.karelia.ru, kuklinovskaya@mail.ru

Received on December 22, 2020 / Approved after reviewing on March 24, 2021 / Accepted on March 25, 2021

Abstract. The article analyzes and summarizes information on breeding and seed production of the main forest-forming and commercial species for the countries of Northern Europe and Russia: Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst). It is shown that in the last 40–50 years Sweden and Finland have completed the first (primary) cycle of plus-tree breeding, and the second cycle is being actively pursued. In terms of seed production, this means a gradual replacement of the 1st generation forest seed orchards with the forest seed orchards of enhanced genetic value (of 1.5 and 2nd generation). By the middle of the 21st century, the productivity of new artificial stands is expected to increase by 20–25 % in terms of stem wood stock due to breeding work. Successful and quite large-scale works were undertaken in plus trees phenotypic breeding and forest seed orchards (1st generation)



planting in some regions of European Russia in the last third of the 20th century. However, even this first (primary) cycle of plus-tree breeding has not been fully completed. The latter makes it possible to lay out the necessary areas of multiplicative populations of increased genetic value – forest seed orchards of the 1.5 generation. Although this is impossible to achieve in many subjects of the Northwestern Federal District due to the insufficient number of selected plus trees and, most importantly, the extremely small area of progeny tests. At present, the vast majority of initially selected plus trees were not genetically tested, which hinders the possibility of further development of the plus-tree breeding system. Russia also lacks special breeding zoning of the main forest-forming species, providing a spatial organization of breeding work and the use of seeds from forest seed orchards. A federal program for the preservation and sustainable management of forest genetic resources of the Russian Federation, together with a number of subprograms for genetic research and breeding of the most important forest-forming species, should be developed to achieve progress in this direction, considering current advances in molecular genetics and biotechnology.

Keywords: forest tree breeding, forest seed orchards, progeny tests, breeding seed production, plus trees, forest breeding in Sweden, forest breeding in Finland, forest breeding in Russia, Northwestern Federal District, *Pinus sylvestris*, *Picea abies*

Acknowledgments: Financial support of the research was provided by the federal budget for the state assignment of the Forest Research Institute and the Department of Multidisciplinary Scientific Research of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences with partial support of the World-class Scientific and Educational Center “Russian Arctic: New Materials, Technologies and research Methods”.

For citation: Raevsky B.V., Ignatenko R.V., Novichonok E.V., Prokopiuk V.M., Kuklina K.K. The Current State of Conifer Species Breeding and Seed Production. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 9–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-9-37>

Россия как страна, обладающая богатейшими лесными ресурсами, при условии перевода своего лесного сектора на интенсивный путь развития и реализации новых возможностей, создаваемых лесной биоэкономикой, способна внести существенный вклад в достижение целей глобального устойчивого развития, а также в решение проблем изменения климата. Значительный прогресс здесь может быть достигнут посредством сокращения концентрации углекислого газа в атмосфере, ускорения процессов декарбонизации экономики, улучшения социально-экономической обстановки на территории сельских поселений лесной зоны и сохранения окружающей среды. Важнейшей предпосылкой реализации названной парадигмы является неуклонное повышение продуктивности вновь создаваемых искусственных насаждений в расчете на длительную перспективу. В данном аспекте лесная селекция рассматривается как один из самых эффективных и экологически безопасных способов увеличения объемов производства древесины, повышения устойчивости лесных экосистем к комплексу неблагоприятных абиотических и биотических факторов.

В России назрела необходимость возрождения всей системы селекционного семеноводства основных лесообразующих пород и перевода ее на новый, качественно более высокий уровень. Для теоретического обоснования данного процесса следует выполнить критический анализ современного состояния и оценку перспектив развития лесной селекции в странах Европы, занимающих передовые позиции в лесохозяйственной науке и практике. В настоящей статье представлена информация о масштабных и долговременных программах

по селекции сосны обыкновенной и ели европейской на территории Швеции и Финляндии, которые являются ближайшими соседями регионов Северо-Западного федерального округа РФ (СЗФО), а также информация о современном состоянии селекции указанных видов на Северо-Западе России.

Особенности селекционной работы с хвойными древесными видами. Под системой селекции обычно понимается комплекс взаимосвязанных и последовательных этапов селекционной работы (отбор, скрещивание, размножение), который в конечном итоге приводит к направленному генетическому сдвигу (увеличению частот нужных аллелей и их сочетаний) в популяциях. Селекция растений традиционно осуществляется в 2 основных направлениях. Так называемая синтетическая селекция базируется на получении новых форм путем полиплоидии, гибридизации, индуцированного мутагенеза, а также с помощью методов генетической инженерии. Например, в 1935 г. известный селекционер Н. Nilsson-Ehle обнаружил гигантское дерево осины в лесах южной Швеции. Дерево оказалось триплоидом. Nilsson-Ehle убедил многих авторитетных лесоводов в необходимости создать ассоциацию по селекции таких основных лесобразующих пород, как сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ель европейская (*Picea abies* (L.) Н. Karst), на основе полиплоидии. Однако триплоиды сосны и ели оказались карликовыми формами. В дальнейшем это объяснилось тем, что виды характеризуются различными эволюционно сложившимися оптимальными уровнями полиплоидии [33].

В 50–60-х гг. XX столетия большие надежды возлагались на индуцированный мутагенез. Однако химические мутагены и радиоактивные излучения порождали широкий спектр летальных и полуметальных мутаций. При этом желательной мутации в конкретном локусе добиться не удавалось. Специфические особенности древесных растений таежной зоны: относительно медленный рост, позднее вступление в генеративный период и длительный онтогенез – пока не позволяют широко применять в лесной селекции методы синтетической селекции, хотя есть и весьма обнадеживающие результаты [1, 3, 19].

Направление «аналитической селекции», основанное на отборе исходного материала из естественного формового разнообразия природных популяций, по-прежнему остается преобладающим в улучшении лесных древесных растений. J. Dietrichson [31] выделил начальные этапы селекционной работы с древесными растениями таким образом: выбор наиболее подходящего вида (породы) с возможной наибольшей продуктивностью; поиск лучших рас в пределах ареала вида; поиск лучших древостоев (насаждений) в пределах лучших рас; отбор в лучших древостоях (насаждениях) лучших экземпляров с высокой генетической ценностью.

Анализируя обозначенные J. Dietrichson этапы, необходимо сфокусировать внимание на следующем. Видовой состав древесной флоры бореальных лесов Европы нельзя назвать богатым главным образом вследствие сравнительно короткого временного промежутка с момента завершения последнего плейстоценового оледенения до настоящего времени. Селекционеры стран Северной Европы в этом аспекте крайне ограничены: единственными аборигенными хвойными лесобразующими породами здесь являются сосна обыкновенная и ель обыкновенная.

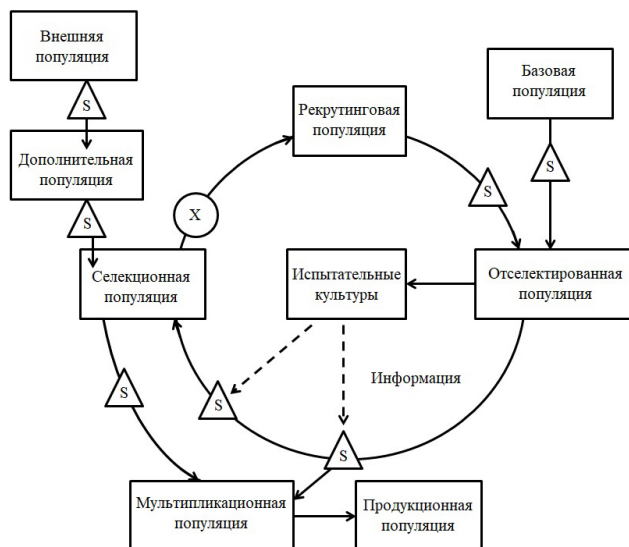
Длительное время первенство по хозяйственной значимости неоспоримо принадлежало сосне. Однако в связи с бурным развитием целлюлозно-бумажной промышленности экономическая ценность еловой древесины начиная со второй половины XX столетия практически не уступает сосновой. Что касается выбора лучших рас (климатипов), то результаты многолетних испытаний в географических культурах за редким исключением свидетельствуют в пользу местных климатипов как самых адаптированных и успешных [15, 16, 35, 37]. Ель обыкновенная в силу особенностей своего послеледникового расселения и гибридной природы североευропейских популяций (*Picea × fennica* Rgl. Kom), сформировавшихся в зоне интрогрессивной гибридизации ели европейской и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), может быть отнесена к числу исключений [17, 36].

Сосна обыкновенная представляет собой пример непрерывной географической изменчивости популяционных систем, где мутации генетической структуры, фенотипических признаков и свойств при отсутствии выраженного горного рельефа происходят плавно (клинально), распространяясь преимущественно в субмеридиональном направлении вслед за изменением фотопериода и других макроклиматических параметров. В силу этого отнесение происхождения (провениенции) той или иной породы к числу «местных» будет определяться лесосеменным районированием и селекционным зонированием территории страны или региона.

Максимальные шансы попасть в категорию лучших (плюсовых) имеют насаждения, сформировавшиеся в оптимальных для данного вида почвенно-гидрологических условиях. Наибольшая неопределенность результата возникает на этапе отбора лучших экземпляров селективируемой породы. Хозяйственно-ценные количественные признаки деревьев экологически лабильны, а многие их габитуральные параметры (толщина, длина ветвей и т. п.) в силу произрастания в густом древостое остаются скрытыми. Поэтому всегда есть вероятность, что выдающийся фенотип того или иного экземпляра является следствием случайно сложившейся для данной особи благоприятной эколого-фитоценотической обстановки. Таким образом, мероприятия по оценке наследственности плюсовых деревьев (ПД) являются обязательными в любом цикле селекции, начиная с базового.

Научная лесная генетика и селекция возникли в конце XIX – начале XX столетия, когда в Европе были проведены значительные опыты по селекции лесных древесных пород, связанные главным образом с изучением и использованием географической формы изменчивости. Особенно активно селекционная работа развернулась с 1936 г. после II мирового съезда лесоводов, на котором S. Larsen представил доклад о клоновых семенных плантациях главных лесообразующих пород. В тот же период шведский селекционер В. Lindquist [49] ввел в употребление понятия «плюсовых», «нормальных» и «минусовых» деревьев.

В настоящее время в странах Европы программы долгосрочной селекционной работы реализуются на базе концепции рекуррентной селекции. Данный термин означает, что определенный набор действий (отбор, скрещивание, испытание потомства, отбор лучших особей и формирование селекционной популяции) повторяется. Так формируются циклы восходящей спирали с результирующим вектором, количественно отражающим рост генетического выигрыша в результате селекционной работы [33]. Общая схема рекуррентной селекции в максимально упрощенном виде представлена на рисунке.



Структура селекционного цикла [58]: S – отбор;
X – скрещивание

The structure of a breeding cycle [58]: S – selection;
X – crossing

Схема предусматривает этапы:

1. фенотипический отбор ПД по комплексу хозяйственно-ценных признаков в плюсовых и нормальных насаждениях;
2. закладка лесосеменных плантаций (ЛСП) I порядка;
3. генетическая оценка отобранных ПД по вегетативному потомству в архивах клонов и на ЛСП I, а также по семенному потомству в испытательных культурах;
4. отбор лучших по результатам испытаний ПД (20–30 % от исходной численности отсеleetированной популяции) для закладки ЛСП I,5 порядка;
5. формирование клоновой селекционной популяции I (СП I), завершающей выполнение первого (базового) цикла плюсовой селекции;
6. проведение в СП I контролируемого скрещивания и получение полносибсовых семей;
7. реализация той или иной программы (стратегии) селекции на базе внутрисемейного отбора;
8. формирование клоновой селекционной популяции II (СП II) и закладка ЛСП II.

В дальнейшем при создании селекционных и мультипликационных популяций более высоких порядков этапы 6–8 повторяются, что должно приводить к формированию селекционных и мультипликационных популяций уровня « $n+1$ ».

В отличие от селекционной работы с давно одомашненными видами сельскохозяйственных растений и животных селекция лесобразующих хвойных – это работа с дикими видами, поэтому первый цикл плюсовой селекции здесь практически идентичен по своей структуре во всех странах. В первом цикле роль рекрутинговой популяции, в которой осуществляется отбор, играет базовая (исходная) популяция, т. е. нормальные и плюсовые насаждения наиболее распространенных для данной породы типов леса, характеризующиеся продуктивностью выше среднего уровня. Именно они становятся ареной массового

отбора лучших по фенотипу ПД. В итоге формируется отселектированная мета-популяция I порядка – совокупность всех отобранных по фенотипу ПД той или иной породы, продолжающих расти в своих популяциях (*in situ*). Клоновые потомства таких деревьев, получаемые обычно путем прививки, образуют отселектированную популяцию, физически сосредоточенную в архивах клонов и на ЛСП I порядка (*ex situ*).

ЛСП выполняют также роль размножающей или мультипликационной популяции. Семена от свободного опыления из такой популяции используются для выращивания посадочного материала и прямого посева на лесокультурных площадях, т. е. для создания продукционных популяций. По результатам испытания семенных потомств от свободного, как правило, опыления лучшие представители (20–30 %) отселектированной популяции используются для создания мультипликационной популяции полуторного порядка (ЛСП I,5 порядка). Далее по тексту термин «порядок» при характеристике селекционного уровня семенной плантации опускается. Часть этих ЛСП I,5 функционально может выполнять роль СП I, являющейся результатом выполнения первого селекционного цикла. Таким образом, начальный цикл рекуррентной плюсовой селекции лесобразующих древесных видов отличается от всех последующих циклов следующими особенностями: природой рекуртинговой популяции, в роли которой выступают природные популяции вида; составом селекционной популяции и ЛСП I,5, формируемых по результатам испытания семенных потомств, полученных преимущественно или только от свободного опыления, т. е. без реализации системы контролируемого скрещивания.

Вероятность реализации различных стратегий селекции определяется совокупностью ряда обстоятельств и условий, однако окончательный выбор, как правило, осуществляется на основе оценок временных и финансовых затрат относительно величины ожидаемого генетического выигрыша. Под генетическим выигрышем понимается относительная разница (%) в продуктивности насаждений, созданных с использованием генетически улучшенных семян, в сравнении с насаждениями, выращенными с использованием обычного семенного материала. Обычно такого рода оценки делаются по результатам исследования динамики таксационных показателей, например среднего прироста стволовой древесины, в испытательных культурах примерно от 15- до 30–40-летнего возраста [38]. Простейший вариант рекуррентной селекции не предполагает интенсивной селекционной работы и может быть представлен следующим образом. Семена, полученные на клоновых ЛСП I, используются для выращивания посадочного материала или прямого посева на лесокультурной площади. По достижении лесными культурами II класса возраста (21–40 лет) в них осуществляется отбор по фенотипу ПД с последующим клонированием методом прививки или иным способом. Новые клоны формируют новое поколение ЛСП, семена с которых используются в лесовосстановлении. Затем цикл повторяется. Такая система требует минимальных вложений, но и генетический выигрыш здесь будет минимальным [33].

Наиболее распространенным следует считать вариант рекуррентной селекции по общей комбинационной способности (ОКС). Традиционно генетическую ценность ПД определяют по общей или специфической (СКС) комбинационной способностям. Данные показатели – это относительное превышение

над контролем величины исследуемого признака у семенных потомств, полученных от свободного (ОКС) или контролируемого (СКС) опыления ПД [22]. Структура первого цикла описана выше. В СП I, являющейся результатом первого цикла, применяется та или иная система контролируемого скрещивания. В испытательных культурах отбираются лучшие семьи и лучшие деревья в них. По характеру относительной направленности отбора различают 2 формы селекции: обратная, когда по результатам испытаний семенного потомства для дальнейшего размножения и формирования селекционной популяции более высокого уровня отбираются родительские особи; прямая, при условии отбора, размножения и участия в селекционной популяции следующего уровня растений из испытательных посадок. В настоящее время в странах Северной Европы во втором и последующих циклах селекции сосны и ели по ОКС практикуется примерно по 6 вариантов программ долгосрочной селекции.

Эффективная программа долговременной селекции должна быть сконструирована таким образом, чтобы гибко реагировать на возможные будущие изменения целей селекционной работы и прогнозируемые в ближайшие 50–100 лет климатические тренды. Для разрешения указанных противоречий американским генетиком G. Namkoong [50] в 80-х гг. XX в. выдвинута идея, получившая название «система селекции множественной популяции». В соответствии с этой концепцией, вся территория страны (региона) делится на некоторое количество зон селекции с учетом важнейших эколого-климатических параметров, например фотопериодических условий и суммы биологически активных температур. Для каждой зоны, по логике схемы рекуррентной селекции, общая для региона отселектированная мета-популяция I порядка делится на отселектированные популяции по 375–750 ПД [28]. По результатам генетической оценки уже в первом цикле селекции в каждой зоне создается СП I – не менее 50 ПД (клонов). Затем селекционная работа ведется в каждой популяции отдельно, при этом возможны ее отличия по направленности и приоритету в отношении селекционируемых признаков. Далее по тексту статьи термин «мета-популяция» будет означать совокупность всех ПД или их клоновых потомств, входящих в состав отселектированных или селекционных популяций в границах страны или региона.

Программы закладки лесосеменных плантаций в странах Северной Европы. Швеция. Системная и в полном смысле научно-обоснованная селекция сосны и ели началась в Швеции в 30-х гг. XX столетия и активно возобновилась сразу по завершении Второй мировой войны, в которой Швеция по сравнению с большинством других европейских государств пострадала в наименьшей степени. Всего выделяют 3 этапа закладки ЛСП [48]. Они, хотя и были в значительной степени определены административно-хозяйственными причинами, хорошо отражают общий ход развития плюсовой селекции хвойных в Швеции. На 1-м этапе закладки ЛСП (≈1949–1972 гг.) ПД отбирались в спелых и перестойных насаждениях. Для сосны это были древостои исключительно естественного происхождения, для ели – лесные культуры, представляющие происхождения как местные, так и континентальной Европы. Всего отобрано 1300 ПД сосны и 900 ПД ели. Большинство размножено прививкой и представлено на клоновых ЛСП I порядка. Типичная ЛСП названного периода имела площадь около 16 га и включала в себя 40 клонов с густотой 400 рамет/га. В следующее 10-летие после 1971 г. заложено лишь несколько ЛСП.

На описываемом этапе ставились следующие первоочередные задачи: заложить ЛСП I порядка и дождаться «цветения»; реализовать частичную диалельную схему контролируемого скрещивания либо получить семена от свободного опыления; организовать селекционно-генетическую оценку отобранных по фенотипу ПД. В испытательных культурах по результатам данной оценки планировалось отобрать лучшие ПД (25–30 %) для закладки ЛСП повышенной генетической ценности (I,5 порядка). Все отобранные на обозначенном этапе ПД были представлены в испытательных посадках, основная часть которых заложена в 70-х гг. XX столетия. Работы по селекционно-генетической оценке массово начали выполняться с середины 80-х гг. Испытание потомств осуществлялось в 5-кратной повторности опыта на многодеревных делянках прямоугольной формы с общим числом семян в потомстве около 200 шт. [29, 48].

В 1982 г. стартовал 2-й этап (≈1981–1994 гг.) скоординированной на общегосударственном уровне программы закладки ЛСП, субсидируемой из государственного бюджета. К этому моменту стали появляться данные, касающиеся селекционно-генетической оценки ПД. Также признано необходимым произвести отбор дополнительных ПД. Новое поколение ПД сосны в количестве около 5000 шт. было отобрано в искусственных молодняках II класса возраста (21–40 лет). Для ели чаще всего это были культуры зарубежного происхождения. Кроме ПД в полевых опытах протестированы клоны (укорененные черенки) ели, полученные в процессе реализации программ клоновой селекции ели для южной и центральной Швеции. В основном они предназначались для создания клоновых сырьевых плантаций. Однако часть этого материала в дальнейшем использована в программе долгосрочной селекции ели.

В ходе 2-го этапа заготовлены черенки для выращивания привитого посадочного материала и закладки ЛСП, а также архивов клонов. Одновременно, в тех случаях, когда это было возможным, собраны шишки с целью получения семян от свободного опыления, что позволило приступить к закладке испытательных культур, не дожидаясь начала женского цветения новых ЛСП. С точки зрения создания ЛСП и использования их семян Швеция была разделена на 20 лесосеменных зон по сосне и 9 по ели. Наборы ПД (клонов) для ЛСП в каждой зоне сформированы исходя из правил, регулирующих перенос семенного материала в Швеции с учетом основных климатических градиентов. В составе многих ЛСП присутствовали генетически проверенные клоны, а несколько ЛСП заложены только проверенным материалом (I,5 порядка). Используются также клоновые потомства ПД из Финляндии. Всего к концу рассматриваемого периода в селекционных программах задействовано 6800 ПД сосны и 5600 ПД ели, а также 13 000 еловых клонов (из укорененных черенков). Создано 350 га ЛСП сосны и 200 га ЛСП ели. В 1995 г. более 90 % семян сосны и 14 % семян ели выращено из семян, заготовленных на ЛСП.

3-й этап стартовал в 2004 г., после того, как в начале XXI в. была согласована новая программа закладки ЛСП – уже без государственной финансовой поддержки. На этом этапе используется исключительно генетически проверенный материал, что подразумевает закладку ЛСП только I,5 и II порядка [48] (табл. 1).

Финляндия. В Финляндии интенсивная селекция аборигенных хвойных видов началась в 1947 г., когда было отобрано первое фенотипически ПД сосны обыкновенной [2]. Первые ЛСП заложены еще в начале 50-х гг. XX сто-

летия, однако широкомасштабные работы стартовали во 2-й половине 60-х гг. и завершились к середине 70-х гг. Изначально ставилась цель полного обеспечения семенным материалом с ЛСП как лесных питомников, так и лесных культур, создаваемых методом посева. В итоге заложено около 3000 га сосновых и 300 га еловых ЛСП. Размножено прививкой 5903 ПД сосны и 601 ПД ели. Средняя площадь ЛСП составила 15,5 га для сосны и 10,9 га для ели при среднем числе произрастающих на плантации клонов 139 и 75 шт. соответственно. По мере старения эти ЛСП I порядка выводятся из хозяйственного оборота – в течение последних 10-летий их площадь постепенно сокращается. Так, к середине первого десятилетия XXI в. использовалось 2202 га ЛСП сосны и 282 га ели [51].

В Финляндии, как и в Швеции, с целью стимуляции репродуктивных процессов и повышения урожайности вегетативные потомства ПД сосны северного происхождения высаживались на ЛСП, которые создавались в южной и центральной зонах страны. Однако ожидаемого эффекта фенологической изоляции клонов сосны северных экотипов не произошло, что вызвало значительное (>50 %) загрязнение плантаций фоновой пылью местного, более южного происхождения. Сложившаяся ситуация привела к потере генетического выигрыша и снижению адаптивной способности посадочного материала при использовании его в районах исходного происхождения материнских ПД. В связи с этим возможности применения семенного материала с ЛСП I были пересмотрены.

ЛСП сосны производят достаточно семян для полного удовлетворения потребностей южной и центральной Финляндии в семенах для лесных питомников и частично для прямого посева. В северных районах страны, характеризующихся наиболее суровыми условиями, такие семена не применяются. Именно этим объясняется, что в общем объеме семян сосны, использованных для посева в питомниках, доля семян с ЛСП составила в 2018 г. 88,2 %. Ситуация по ели складывалась иначе. ЛСП ели вступили в период активного семеношения позднее сосновых плантаций. В течение 1990-х гг. доля генетически улучшенных семян ели, ежегодно высеваемых в питомниках, возросла с 10 до 80 %. Однако неравномерное семеношение и большая доля поражения шишек вредителями послужили причиной снижения этого показателя за последнее 5-летие до 67,4 % [60].

Следует отметить, что лесосеменное районирование в Швеции, и Финляндии осуществляется в системе географических координат. Так, для семян сосны популяционного сбора в Финляндии диапазон переноса составляет $\pm 1^\circ$ по широте и 500 км в направлении восток–запад. Для каждой ЛСП установлен район применения семян на основе вычислений по специальной методике с учетом суммы эффективных температур мест произрастания ПД и суммы эффективных температур места ЛСП [4].

В Финляндии новое поколение ЛСП с использованием генетически проверенных клонов (ЛСП I,5 порядка) закладывается начиная с конца 90-х гг. За счет семян с таких плантаций ставится задача добиться увеличения генетического выигрыша не менее чем на 10 % по сравнению с ЛСП I. Для достижения поставленной цели предполагается взять примерно 20 % лучших по результатам испытаний ПД. На ЛСП должно быть представлено 20–30 клонов. Для обеспечения семенами северных районов запланирована закладка ЛСП I,5 существенно севернее, чем это делалось для ЛСП I.

Согласно экспертным оценкам, в Финляндии до 2030 г. для посева в питомниках ежегодно необходимо будет иметь 1827 кг семян ели и 542 кг семян сосны. Дополнительно к этому ежегодно требуется 3416 кг семян сосны в целях создания лесных культур посевом. Указанные потребности возможно обеспечить при наличии 290 га ЛСП ели и 610 га ЛСП сосны [51]. Современное распределение площади аттестованных ЛСП и ПД по породам и категориям представлено в табл. 1.

Таблица 1

Количество ПД (шт.) и площадь (га) аттестованных ЛСП сосны и ели в Швеции и Финляндии на 2021 г.

The number of pine and spruce plus trees (pcs) and the area (ha) of forest seed orchards included in the national list in Sweden and Finland as of 2021

Страна	Порода	ПД, шт.		Площадь ЛСП, га	
		отобрано	протестировано	I	I,5
Швеция [60]	<i>Pinus sylvestris</i>	6800	6800	1028,0	461,3
	<i>Picea abies</i>	6000	6000	379,7	106,0
Финляндия [34]	<i>Pinus sylvestris</i>	5903	5800	1058,7	244,4
	<i>Picea abies</i>	2770	1700	282,0	87,7

Суммарный генетический выигрыш интерпретируется как сумма выигрышей от эффекта отдаленной внутривидовой гибридизации на ЛСП, ряда эпигенетических эффектов (повышенная крупность и однородность семян, что обеспечивает ускоренный рост сеянцев), эффекта районирования (допустимого перемещения) семенного материала и собственно эффекта селекции. Реальный генетический выигрыш оценивается с учетом эффекта загрязнения ЛСП фоновой пылью, доля которой на молодых плантациях весьма значительна [48]. Получение лесоводственного и экономического эффектов от лесной селекции становится возможным главным образом посредством использования генетически улучшенных семян с ЛСП различного уровня. Поэтому обобщенные данные по достигнутой и прогнозной лесоводственной эффективности применения генетически улучшенного посадочного материала в Швеции и Финляндии, представленные в табл. 2, отражают прежде всего успехи в создании мультипликационных популяций [38]. На момент 2014 г. выигрыш достигнут путем использования семян преимущественно с ЛСП I порядка, в то время как к середине XXI в. он должен обеспечиваться ЛСП I,5 (в основном) и II порядка.

К указанному временному рубежу потребности искусственного лесовосстановления сосны в Швеции должны полностью удовлетворяться за счет семян с ЛСП. По ели 5 % посадочного материала планируется получать вегетативным размножением по программам клоновой селекции. Прогнозируемый генетический выигрыш – до 40 %. В Финляндии предполагаемая доля посадочного материала сосны, выращиваемого из генетически улучшенных семян, ниже, чем в Швеции. Особенно заметна разница по северной зоне, связанная с отсутствием здесь ЛСП. Недостающий посадочный материал необходимо выращивать из семян популяционного сбора. В Южной Финляндии 25 % сеянцев ели запланировано получить вегетативным размножением в целях обеспечения 35 % генетического выигрыша [38].

Таблица 2

Фактическая и прогнозная лесоводственная эффективность использования генетически улучшенного посадочного материала в Швеции и Финляндии
Actual and predicted forestry effectiveness of genetically improved planting stock in Sweden and Finland

Порода	Географическая зона страны	2014 г.				2050 г.	
		Средний прирост, м ³ /га	Оборот рубки, лет	Генетический выигрыш	Доля посадочного материала	Генетический выигрыш	Доля посадочного материала
%							
<i>Швеция</i>							
Сосна	Северная	3,3	100	12	90	23	100
	Центральная	4,9	80	10	100	21	100
	Южная	5,3	70	10	100	21	100
Ель	Северная	3,4	90	9	90	21	95
	Центральная	7,6	70	9	80	17	95
	Южная	10,0	55	12	64	21	95
<i>Финляндия</i>							
Сосна	Северная	2,0	100	15	20	25	45
	Южная	5,0	70	15	75	25	70
Ель	Северная	3,0	100	10	10	20	80
	Южная	7,0	70	10	50	20	70

Долговременные селекционные программы в странах Северной Европы. Селекция сосны обыкновенной. В Швеции практически все ПД сосны в настоящее время проверены по потомству. Испытательные культуры первого цикла состояли из полносибсовых семей (частичная диаллельная схема скрещивания) и полусибсовых потомств, полученных в результате поликросса (опыление смесью пыльцы) или свободного опыления. По результатам этих испытаний отобрано около 1500 лучших ПД, в дальнейшем подразделенных на 24 СП I, включающие 50–70 ПД. Селекционные популяции соответствовали зонам селекции, разделяющим в субширотном направлении всю территорию страны [28, 30].

В пределах каждой популяции клоны скрещиваются по схеме двойного парного скрещивания, чтобы получить 50 полносибсовых семей. Скрещивание проводится с использованием «положительного ассортативного подхода», т. е. члены селекционной популяции ранжируются по своей генетической ценности, после чего близкие по своему рангу ПД назначаются в пары для скрещивания. В дальнейшем оказывается возможной реализация нескольких стратегий селекции [55].

Стратегия «кандидаты семян, обратная» предполагает выращивание в селекционном архиве по 10–20 полносибсовых растений из каждой семьи, стимулирование их возможно более раннего женского цветения, а затем скрещивание по схеме поликросса. Полученное семенное потомство испытывают в посадках и отбирают по одной лучшей родительской особи на вариант скрещивания. Отобранные деревья клонируют для формирования СП II из 50 клонов [53].

В соответствии со стратегией «клонные реплики, прямая», от 20 до 40 полносибсовых растений клонируют и высаживают в 4 отдельных полевых опытах. В дальнейшем отбирают один лучший клон на семью для формирования СП II из 50 клонов [55].

В рамках стратегии «расширенная селекционная популяция, прямая» высаживают в 5 отдельных полевых опытах по 100 семян из каждой полносибсовой семьи (итого 25 000 шт.). После достижения посадками высоты 3–5 м (примерно 20 % от оборота рубки) производят учеты и замеры. По результатам испытаний отбирают по 2 лучших дерева на семью и с них заготавливают черенки. Создают селекционные архивы, где высаживают 100 вновь полученных клонов (по 5 рамет на клон). После появления женского цветения осуществляют контролируемое скрещивание по схеме двойного парного скрещивания. В итоге формируется новая рекрутинговая популяция второго цикла, состоящая из 100 полносибсовых семей. Реализация такой схемы позволяет проводить отбор не только в семьях, но и между ними. В итоге возможно выделение группы суперэлитных клонов для достижения максимального генетического выигрыша [55].

В настоящее время в Финляндии выделено 6 селекционных зон сосны. Для каждой зоны предполагается иметь селекционную популяцию в размере 160 ПД, за исключением самой северной зоны – 60 ПД. Также планируется сформировать популяцию из 60 ПД происхождением из Эстонии, Швеции и самой южной части Финляндии. Таким образом, формируется общая селекционная мета-популяция (СП I) количеством около 1000 ПД, что означает отбор 17 % лучших ПД из числа всех отобранных по фенотипу в начале первого цикла селекции [44].

В селекционной популяции проводится контролируемое скрещивание по однопарной схеме. Для 25 % лучших ПД обычно используются 2–3 комбинации. Таким образом, формируется рекрутинговая популяция, включающая в среднем по 120 растений на полносибсовую семью (у высокоранговых ПД – больше, у низкоранговых – меньше). Рекрутинговая популяция высаживается в 2–3 отдельных опытах в пределах селекционной зоны. Далее реализуется стратегия «полевые кандидаты, обратная». В 15-летнем возрасте отбирается 5–20 (в зависимости от ранга семьи) лучших растений из каждой семьи для формирования отселектированной популяции. Потомство от свободного опыления этих деревьев (80–120 растений) опробуется в течение примерно 15 лет на 4–6 участках испытательных культур, как в пределах селекционной зоны, так и вне ее, для оценки климатической устойчивости селекционного материала. По результатам испытаний отбирается по одному лучшему родительскому дереву из каждой полносибсовой семьи, которые вегетативно размножаются прививкой и формируют СП II из 50 клонов. В настоящее время контролируемое скрещивание и создание рекрутинговых популяций закончено для 3 самых южных селекционных зон, а для оставшихся 3 северных сформирована СП I.

Селекция ели обыкновенной. Стратегии селекции, применяемые для работы с сосной обыкновенной, применимы и в отношении ели. Главные различия определяются тем, что молодые растения ели вегетативно размножить гораздо проще, чем сосны. Компьютерное моделирование показывает, основная на текущий момент в Швеции и Финляндии селекционная стратегия для ели с использованием клоновых испытательных посадок является лучшей с генетической и экономической точек зрения [53, 54].

В Финляндии, например, селекционная мета-популяция (СП I) включала 900 ПД, прошедших генетическую оценку: 5 селекционных популяций, состоящих из 800 ПД (по 160 ПД каждая), и 100 ПД прибалтийского происхождения, формирующих дополнительную популяцию. Как уже отмечалось, селекционные популяции сосны и ели в Финляндии по численности превосходят шведские. Селекционные зоны в Финляндии также крупнее, поскольку вертикальная расчлененность рельефа в этой стране существенно меньше [42], чем в Швеции.

Для создания рекрутинговой популяции осуществляется контролируемое скрещивание с использованием систем одинарного и двойного парного скрещиваний. Результатом является получение одной полносибсовой семьи (120 семян) на каждое ПД. В Финляндии в качестве базовой принята система однопарного скрещивания, однако лучшие ПД (25 %), т. е. 40 особей, обладающих высшими рангами, скрещиваются по системе двойного парного скрещивания. Все системы скрещивания реализуются с применением «положительного assortативного подхода». В дополнение к полносибсовым потомствам в испытательных культурах размещают полусибсовые семьи в качестве дополнительного источника материала для рекрутинговой популяции.

Поскольку в Швеции размер селекционной популяции меньше, чем в Финляндии, то в качестве базовой принята система контролируемого двойного парного скрещивания с использованием положительного assortативного подхода. В обеих странах практикуются различного рода отклонения от описанных выше схем, связанные с конкретными ситуациями: обилием женского цветения и наличием достаточного количества пыльцы у тех или иных клонов.

В Финляндии полносибсовые сеянцы выращиваются в теплице и отбираются по энергии роста и времени распускания верхушечной почки. Сеянцы, склонные к раннему распусканию почки, выбраковываются. В конечном счете 30–35 наиболее хорошо развитых сеянцев из каждой семьи используются в качестве кандидатов для испытания в клоновых посадках. Иногда такой отбор по фенотипу производится в 5–7-летних испытательных культурах, в этом случае для клоновых испытаний отбирается 10–15 растений [62].

В Швеции практикуется в целом аналогичный подход. Полносибсовые сеянцы (120 шт. на семью) выращиваются в течение одного сезона в теплице. Для дальнейшего испытания в клоновых посадках отбирается по 40 лучших сеянцев (кандидатов) на семью. Каждый вариант клонового материала испытывается в 6 полевых опытах, при минимально допустимом их числе, равном 4. Такие испытательные посадки обычно размещаются на бывших сельскохозяйственных землях. Каждый кандидат должен быть представлен 24–36 укорененными черенками, т. е. по 6–8 рамет на опыт. В Швеции – это 6 рамет на опыт и, соответственно, 16 рамет на клон. Опыты закладываются в различных климатических условиях. Один из них создается поблизости от селекционного центра для проведения в дальнейшем контролируемого опыления между отобранными клонами. Окончательная оценка осуществляется, когда культуры достигают возраста 15–18 лет, при этом предварительные оценки могут быть даны несколькими годами ранее. У лучших деревьев отобранных (лучших) клонов стимулируется цветение. Если эти попытки терпят неудачу, то отселектированные особи размножаются прививкой. Осуществляется меж- и внутрисемейный отбор. В итоге СП II должна состоять из 40 лучших семей (40 сублиний) по 4 генотипа на сублинию в качестве меры по предотвращению инбридинга [62].

Завершая рассмотрение селекционных стратегий, применяемых при селекции сосны и ели в Швеции и Финляндии, следует особо остановиться на важнейших методических аспектах организации полевых опытов по испытанию семенных потомств – членов отселектированной и селекционной популяций. Максимально точные измерения удобно проводить при средних высотах в диапазоне от 3 до 5 м, когда возможны непосредственные измерения с помощью мерного шеста. Учеты в испытательных посадках проводят не менее 3–4 раз и выделяют этапы в зависимости от возраста насаждения: до 3 лет, 5–7 лет, 12–17 лет. Общий период испытаний должен составлять не менее 20 % от величины ротационного периода для древостоев данного вида (см. табл. 2). Таким образом, оценки в лесокультурном возрасте 15–17 лет считаются окончательными, а в 5–7 лет – предварительными.

Потомства обязательно испытываются в нескольких повторностях полевых опытов, количество которых может варьировать от 2–3 до 5–6 (участки) как в пределах селекционной зоны, так и с выходом за ее границы. Практикуется методика абсолютно рандомизированного размещения однодеревных повторностей одного варианта. Количество таких повторностей обычно составляет 20–30 шт. на семью в отдельном опыте. При испытании семенных потомств отселектированных представителей полносибсовых семей от поликросса или свободного опыления они рандомизировано размещаются в пределах блока, выделенного на данную семью [56, 57, 62]. Для получения достоверных оценок генетического выигрыша от использования семян с ЛСП различного порядка требуется создание более долговременных опытов (30–40 лет и более) по принципу многодеревных делянок. Однако результаты сравнительных исследований свидетельствуют о тесной положительной корреляции (0,8) в возрастном промежутке 10–30 лет средней высоты, прироста в высоту, диаметра и объема ствола в опытах с однодеревными повторностями и запаса на 1 га в опытах с многодеревными делянками. В селекционной работе методика однодеревных повторностей оказывается более эффективной [41].

Из сказанного выше можно заключить, что реализация селекционных программ древесных видов является достаточно затратным мероприятием, особенно во временном отношении. Продолжительность отдельного селекционного цикла варьирует в пределах 21–33 лет в зависимости от избранной стратегии [55]. В преодолении временного фактора большие надежды связаны с прогрессом в области биотехнологий вегетативного размножения хвойных древесных видов. Для вегетативного размножения ели европейской могут быть использованы укорененные черенки. Однако способность черенков к укоренению определяется множеством факторов и сильно колеблется в зависимости от их сочетания [24, 27]. В связи с высокой себестоимостью в Швеции и Финляндии этот метод не нашел широкого применения [39, 43]. Сосна обыкновенная практически не поддается вегетативному размножению укорененными черенками, в связи с чем для вегетативного размножения этого вида особенно актуальным является метод соматического эмбриогенеза (СЭ) [40].

СЭ – вегетативный способ массового размножения растений, основанный на естественно присущей клеткам растений тотипотентности и способности к регенерации, т. е. восстановлению целого организма из его части. СЭ позволяет производить большое количество генетически однородных саженцев, отобранных в ходе селекционных программ генотипов. В сочетании с криоконсервацией СЭ позволяет надежно сохранять генетический материал, который в случае

традиционных методов селекции может быть утерян в связи с длительностью циклов селекции. При условии применения геномной селекции СЭ значительно сокращает продолжительность и стоимость генетико-селекционных исследований, одновременно увеличивая генетический выигрыш [26, 39, 45, 52].

Несмотря на то, что методы СЭ описаны для многих хвойных видов, в том числе для ели европейской и сосны обыкновенной, их использование ограничено высокой трудоемкостью и, как следствие, значительной стоимостью производства соматических растений [46, 58, 59]. Для решения этой проблемы необходима автоматизация процесса СЭ. На сегодняшний день автоматизированные системы для крупномасштабного получения соматических эмбриональных растений еще не используются в коммерческих целях. Однако активная разработка таких систем позволяет предполагать, что в ближайшем будущем метод СЭ будет применяться для массового промышленного производства соматических саженцев, в том числе и для размножения ели европейской [32, 61].

Есть несколько примеров использования СЭ в коммерческих целях. В лесном хозяйстве существует 2 подхода к применению СЭ. Первый – непосредственное производство соматических саженцев. Этот подход практикуется крупными коммерческими компаниями (CellFor и Arborgen) для размножения *Pinus taeda*, которая не поддается размножению укорененными черенками. Во Франции СЭ используется для размножения особо ценных полносибсовых потомков *P. pinaster*, полученных от родителей высокой генетической ценности. При этом ежегодно производится до 15 000 соматических саженцев, полученных от более чем 2000 клонов. Высокая стоимость использования СЭ для размножения ценных генотипов *Abies nordmanniana*, выращиваемых в качестве рождественских деревьев, компенсируется их высокой рыночной стоимостью. Второй подход основан на применении СЭ для производства растений-доноров, которые затем используются для получения черенков [57]. Такой подход применяется в Ирландии и Новой Зеландии при работе с *Picea sitchensis* и *Pinus radiata* [46]. Для этих видов разработаны эффективные методы размножения укорененными черенками, поэтому высокие затраты на производство соматических саженцев в дальнейшем компенсируются большим числом растений, выращенных из черенков.

Интеграция СЭ, геномного отбора и криоконсервации является основой для внедрения многосортного лесного хозяйства [39, 52].

В Канаде метод СЭ используется для размножения *Picea glauca* и *P. abies* при реализации программы многосортного лесного хозяйства. Из семян от контролируемого скрещивания членов селекционной популяции получают эмбриогенный каллус, который сохраняют путем криоконсервации. Одновременно с этим из части эмбриогенного каллуса получают соматические растения, используемые в полевых испытаниях. Отобранные по итогам полевых испытаний лучшие линии массово размножают и выращивают на ЛСП [52].

Метод геномной селекции основан на оценке селекционной и генетической ценности особей по различным количественным признакам, в том числе скорости роста и качеству древесины, с использованием их геномных профилей [26]. Данный метод активно развивается, в том числе применительно к ели европейской и сосне обыкновенной [47]. Геномная селекция позволяет значительно сокращать время генетико-селекционных исследований [25, 27]. В случае использования геномной селекции, генотипирование линий, полученных путем СЭ, может быть выполнено с применением эмбриогенной ткани, зрелых соматических зародышей или проростков [52].

Селекционные программы на Европейском Севере и Северо-Западе России.

На территории СЗФО России в качестве основных объектов лесной селекции принято рассматривать такие аборигенные виды, как сосна обыкновенная, ель европейская, ель сибирская, и их спонтанный гибрид – ель финскую. Отбирались также ПД сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* DuRoi), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledebur), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Djl), которые для некоторых регионов выступали в роли интродуцируемых видов. В отдельных регионах учтены ПД ценных интродуцентов североамериканского происхождения: сосна скрученная (*Pinus contorta* S. Watson), туя западная (*Thuja occidentalis* L.), псевдотсуга Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) и др. Поскольку именно сосна обыкновенная и виды ели встречаются в лесах всех субъектов СЗФО, в настоящем разделе уровень развития единого селекционно-генетического комплекса (ЕГСК) регионов оценивался по представленности селекционных объектов указанных пород.

В европейской части России систему плюсовой селекции начали реализовывать во 2-й половине 60-х гг. XX столетия, когда были отобраны первые ПД и заложены экспериментальные участки прививочных ЛСП [18]. Закладка ЛСП в производственных масштабах стартовала с середины 70-х гг. и в последующие 15 лет была заложена большая часть функционирующих и сегодня ЛСП [5, 21]. В 90-е гг. XX столетия вследствие экономического кризиса и масштабных социально-экономических реформ работы в области лесной селекции и семеноводства практически полностью прекратились.

Показатели, отражающие современное состояние ЕГСК субъектов СЗФО и представленные в Лесных планах [6–14] преимущественно по состоянию на 2018–2020 гг., в разрезе основных категорий объектов приведены в табл. 3.

Анализ информации, представленной в табл. 3, позволяет заключить, что субъекты СЗФО существенно отличаются друг от друга как по размерам покрытой лесом площади, так и по параметрам, характеризующим развитие системы плюсового селекционного семеноводства. Очевидно, что при анализе лесохозяйственных проблем в целом и проблем лесного селекционного семеноводства в частности СЗФО не может рассматриваться как совокупность субъектов с примерно равным уровнем развития и в этом смысле требует структурного подхода. К первой группе регионов следует отнести Республики Карелию и Коми, а также Архангельскую и Вологодскую области, традиционно считающиеся «многолесными» регионами со значительной долей лесной и деревообрабатывающей промышленности в структуре своих экономик. Для указанных регионов свойственна экстенсивная форма ведения лесного хозяйства, самыми высокотехнологичными процессами являются заготовка и переработка древесины, все остальные мероприятия, в том числе лесовосстановительного характера, осуществляются по наименее затратному варианту. По ряду природных и социально-экономических причин вторая группа регионов – Ленинградская, Новгородская и Псковская области – никогда не относилась к категории «многолесных» районов европейской части России с выраженной лесосырьевой ролью. Уровень интенсивности лесохозяйственных мероприятий здесь традиционно выше, чем в регионах первой группы. Мурманская и Калининградская области образуют третью группу регионов СЗФО. Особенности географического положения и истории накладывают отпечаток на развитие лесного селекционного семеноводства в данных областях.

Таблица 3

Структура ЕГСК по субъектам СЗФО РФ
 The structure of the unified breeding and genetic complex by the subjects of the Northwestern Federal District of Russia

Субъект	Покрытая лесом площадь, тыс. га	ПД, шт.	Плосовые насаждения	ЛСП и архивы клонов	Постоянные лесосеменные участки	Лесные генетические резерваты	Испытательные и географические культуры	ПД, шт. / 1000 га покрытой лесом площади
Архангельская область	21 695,0	428	41,0	18,0	253,6	47 300,0	41,2	0,02
Вологодская область	9961,6	867	1004,5	228,0	61,4	1447,9	45,9	0,09
Калининградская область	272,8	416	29,1	23,8	2,0	–	3,3	1,52
Ленинградская область	4545,6	876	81,2	334,0	189,9	962,0	56,2	0,19
Мурманская область	5125,6	86	42,0	–	–	1724,0	17,0	0,02
Новгородская область	3359,5	720	32,4	60,2	43,5	173,0	47,8	0,21
Псковская область	2148,3	911	183,3	127,9	–	1441,0	–	0,42
Республика Карелия	9523,1	1520	431,7	448,9	–	4605,6	56,3	0,16
Республика Коми	28 692,8	2548	188,6	179,4	36,4	28 000,0	69,5	0,09

Начиная анализ существующего положения дел в области лесной селекции в СЗФО с третьей группы регионов, прежде всего следует отметить, что Калининградская область – это самый западный регион РФ, являющийся анклавным и одним из самых маленьких по площади среди других субъектов. Здесь произрастают хвойно-широколиственные леса подтаежного типа. Главные хвойные лесообразующие породы – ель европейская и сосна обыкновенная. В свете изложенных выше принципиальных положений рекуррентной плюсовой селекции территория области должна рассматриваться в качестве единой зоны селекции для сосны и ели, что требует присутствия здесь порядка 600 экземпляров ПД каждой породы. Несмотря на наличие в реестре 416 шт. отобранных ПД, что обеспечивает региону самый высокий среди других регионов показатель по числу ПД на 1000 га покрытой лесом площади, сосны обыкновенной отобрано всего 58 ПД и ели – 11. Располагая столь малым количеством ПД, практически невозможно приступить к осуществлению в пределах региона интенсивных селекционных программ по указанным видам [8].

Мурманская область – самый высокоширотный регион СЗФО, поэтому таежные экосистемы занимают менее 30 % ее территории. В южной и западной частях области, где наиболее ощутим отепляющий эффект Гольфстрима, преобладают сосновые леса, а в восточной части роль основного эдификатора лесных сообществ переходит к ели сибирской. В Мурманской области учтено более 5 млн га покрытой лесом площади, в пределах которой отобрано всего 86 ПД сосны обыкновенной. По ели ПД не отбирались [10]. Столь малое количество ПД может быть отчасти объяснено суровыми природно-климатическими условиями региона и дефицитом высокопродуктивных сосновых фитоценозов. Сосновая отселектированная популяция для Мурманской области могла бы быть пополнена за счет ПД, отобранных в северной части Карелии, расположенной севернее $65^{\circ}00'$ с. ш., в количестве 206 шт. Однако и этого будет недостаточно для формирования здесь полночисленной отселектированной популяции сосны обыкновенной.

В то же время лесное хозяйство данного региона постоянно испытывает дефицит районированных семян основных лесообразующих пород. Для Мурманской области должна осуществляться специальная (арктическая) селекционная программа по сосне обыкновенной. Для реализации такой программы необходимо довести количество ПД сосны до требуемых 600 экземпляров и предусмотреть создание ЛСП в районах с благоприятным микроклиматом в широтном диапазоне $65^{\circ}00' - 66^{\circ}30'$ с. ш., т. е. до широты северного полярного круга.

Оценивая уровень развития селекционного семеноводства в группе «многолесных» регионов, необходимо отметить, что Республики Карелия, Коми и Архангельская область достаточно велики по площади и существенно вытянуты в субмеридиональном направлении. Это обуславливает значительное разнообразие природно-климатических условий и необходимость выделения для сосны и ели не менее 3 селекционных зон в границах каждого субъекта. Особенностью отселектированных популяций обоих видов в данных регионах является то, что подавляющее число ПД отобрано в пределах наиболее освоенных южных районов. Например, в Карелии, где на сегодняшний день учтено 1136 растущих ПД сосны, только южная часть территории ($60^{\circ}40' - 63^{\circ}00'$ с. ш.) в полной мере обеспечена ими – более 700 экземпляров. В Карелии все ПД ели (367 шт.) отобраны также в указанных выше пределах и их недостаточно для

формирования даже одной отселектированной популяции [13]. Все имеющиеся в Архангельской области 256 ПД сосны произрастают в подзоне средней тайги, а это означает, что ни одна из селекционных зон, в случае выделения их здесь, не будет в полном объеме обеспечена исходной отселектированной популяцией [6].

Республика Коми является единственным субъектом СЗФО, в котором в 90-х гг. XX столетия и в первое 10-летие XXI в. наблюдалось поступательное развитие лесного ЕГСК. В указанный период увеличивалось число ПД, площади ЛСП I порядка и испытательных культур [21]. Сегодняшний уровень развития ЕГСК Республики Коми позволяет приступить к осуществлению региональной программы селекции по сосне обыкновенной. Исходя из имеющейся информации о пространственном положении и количестве учтенных на сегодняшний день ПД сосны, можно заключить, что по крайней мере 2 селекционные зоны обеспечены здесь селекционными популяциями [14].

Вологодская область в настоящее время один из наиболее динамично развивающихся регионов в сфере использования и воспроизводства лесов. Высокая лесистость региона, особенно его северной части, сравнительно благоприятные почвенно-климатические условия, наличие значительных массивов производных лесов с преобладанием ели делают область привлекательной для реализации крупных инвестиционных проектов в области целлюлозно-бумажного производства. Вологодская область может иметь хорошие перспективы с точки зрения развития интенсивного искусственного лесовосстановления (плантационного лесовыращивания) с целью формирования постоянной лесосырьевой базы для целлюлозно-бумажного производства. Сегодня создание высокопродуктивных лесных плантаций возможно только на селекционно-генетической основе. Из субширотной вытянутости региона и примерно равной представленности на его территории подзон средней и южной тайги следует предположение, что выделение 2 зон селекции, как по сосне, так и по ели, было бы достаточным. В настоящее время на территории области учтено 877 ПД, в том числе 232 ПД сосны и 572 ПД ели [7]. Очевидно, что с точки зрения реализации селекционных программ указанного количества деревьев совершенно недостаточно по сосне, а по ели хватает только на одну отселектированную популяцию. В границах Вологодской области селекционная работа с елью должна иметь наивысший приоритет.

Ленинградская, Псковская и Новгородская области расположены на крайнем северо-западе РФ и в значительной степени сходны по комплексу природно-климатических характеристик. Территория Ленинградской области, а также северная часть Новгородской области находятся в подзоне южной тайги; Псковская область и южная часть Новгородской области – в зоне хвойно-широколиственных лесов. В покрытой лесом площади указанной группы регионов велика доля лиственных насаждений, а в структуре хвойных лесов преобладают сосняки. Учитывая высокую транспортную доступность, благоприятные климатические условия, значительные размеры земель, вышедших из-под сельскохозяйственного использования, названные регионы имеют все необходимые предпосылки для развития интенсивного лесовыращивания, т. е. для создания лесосырьевых плантационных культур сосны и ели. Именно плантационное лесоводство могло бы дать толчок для реализации селекционных программ в отношении указанных видов. В силу обозначенных особенностей на территории каждого из субъектов следует определить по одной зоне селекции для сосны и ели.

В настоящее время в Ленинградской области учтено 876 растущих ПД, в том числе 541 ПД сосны и 282 ПД ели. Таким образом, фактическая численность отселектированной популяции сосны практически близка к нормативной. По ели она должна быть увеличена вдвое [9]. Новгородская область имеет 720 ПД, в том числе сосны – 394 шт. и ели – 274 шт. То есть фактические численности отселектированных популяций еще далеки от оптимальных параметров [11]. Псковская область, являясь самой небольшой по лесной площади в пределах своей группы, в то же время обладает достаточно развитым генетико-селекционным комплексом. Как следует из данных табл. 3, на этой территории хорошо представлены все категории ЕГСК, показатель среднего числа ПД на 1000 га покрытой лесом площади является одним из наивысших в границах СЗФО. Всего в области учтено 911 ПД – 449 шт. сосны и 385 шт. ели, что, однако, недостаточно для формирования полноценных отселектированных популяций по обоим видам [12].

Следует отметить, что Ленинградская и Псковская области по степени развития ЕГСК в значительной степени готовы к реализации селекционных программ по основным лесообразующим породам. Приступая к их выполнению, необходимо пополнить отселектированные популяции до требуемой нормативной численности в 600 экземпляров по каждой породе и развернуть работы по селекционно-генетической оценке отобранных по фенотипу ПД. По мере реализации данных мероприятий будут созданы предпосылки для формирования СП I и создания ЛСП повышенной генетической ценности (I,5 порядка).

В настоящее время достаточно сложно оценивать перспективы развития лесной селекции и семеноводства в России в целом и в рассматриваемом федеральном округе в частности. Это связано прежде всего с тем, что фактически единственным открытым источником информации по данному вопросу остаются действующие Лесные планы регионов с перспективой до 2028 г., в которых информация по данному вопросу должна быть отражена в специальном разделе. Последнее, как правило, имеет место, но наполняемость соответствующего раздела сильно варьирует по регионам. На предстоящее 10-летие в Лесных планах регионов третьей группы никаких мероприятий по отбору ПД, насаждений, созданию ЛСП и иных объектов лесного семеноводства нет. В регионах первой группы есть планы по закладке ЛСП, постоянных лесосеменных участков и испытательных культур. Так, в Архангельской области планируется закладка 30 га ЛСП; в Республике Карелии – создание 10 га ЛСП (I,5 порядка), 20 га архивов клонов и 40 га испытательных культур; в Вологодской области – закладка 28,5 га ЛСП и 10 га постоянных лесосеменных участков. В Республике Коми создания объектов ЕГСК в ближайшей перспективе не планируется. В отношении регионов второй группы следует отметить, что действующие Лесные планы в Ленинградской и Псковской областях не предполагают мероприятий по созданию объектов ЕГСК. Лишь в Новгородской области есть планы по закладке 16,1 га ЛСП.

Подводя итог, еще раз подчеркнем существенное различие между регионами СЗФО по представленности категорий объектов ЕГСК. Из всех категорий объектов следует выделить ПД, ЛСП и испытательные культуры в качестве критически важных для дальнейшего развития системы плюсовой селекции. Малое число ПД, не позволяющее сформировать полноценные исходные отселектированные популяции, представляет собой серьезную проблему, блокирующую дальнейшее развитие системы селекционного семеноводства. Из всей совокупности проанализированных регионов СЗФО только Республики

Карелию и Коми, а также Вологодскую, Ленинградскую и Псковскую области следует считать в наибольшей степени готовыми к реализации селекционных программ по сосне и ели. При этом в 3 из 5 перечисленных субъектов на ближайшее 10-летие не запланировано мероприятий по развитию системы объектов ЕГСК. В регионах СЗФО нет также перспективных планов по отбору ПД.

Обширность территории РФ и качественные различия между ее регионами делают крайне затруднительным их сравнение по степени развития ЕГСК в масштабах всей страны. Тем не менее выкладки, приводимые в некоторых обзорных статьях, следует считать весьма показательными. Так, В.В. Тараканов [20] отмечает, что в лидирующих на территории Сибири по селекционному семеноводству Новосибирской области и Алтайском крае фонд ПД по всем видам составляет в настоящее время всего около 600 шт. на регион. В качестве положительного примера в данном аспекте авторами приводится Республика Карелия. Также многие исследователи указывают на очень неблагоприятную тенденцию, когда в целом по РФ за последние 25 лет оказываются списанными по разным причинам в среднем до 50 % площади или количества селекционных объектов [23].

Другим серьезным препятствием на пути плюсовой селекции является громоздкость и архаичность системы испытания ПД. Следствием этого становятся малые площади испытательных культур и, соответственно, отсутствие результатов генетической оценки по семенному потомству большинства отобранных ПД [20]. Согласно требованиям [22], испытательные культуры должны создаваться одновременно в 2–3 наиболее распространенных типах лесорастительных условий данного региона. Методика закладки испытательных культур предусматривает посадку семенного потомства каждого ПД и контроля в 3-кратной повторности на делянках прямоугольной формы рядами в количестве не менее 100 растений (при дефиците семян ПД из северной подзоны тайги – не менее 60). На первом этапе генетической оценки (по достижении потомствами II класса возраста) должны выбраковываться до 20–25 % потомств, занимающих низшие ранги в испытываемой совокупности по селектируемому признаку. Второй этап отбраковки деревьев осуществляется с интервалом в 10–15 лет после первого. Окончательная генетическая оценка ПД требует временного промежутка не менее 1/2 возраста рубки или возраста спелости, принятого для данного вида в конкретной лесорастительной зоне.

Для создания ЛСП повышенной генетической ценности (ЛСП I,5 порядка) могут быть использованы ПД, семенные потомства которых по результатам предварительной оценки по селектируемым признакам (после первого и второго этапа) оставлены в качестве относительно лучших в испытываемой совокупности. На ЛСП II должны быть представлены только элитные ПД с семенными потомствами, имеющими по результатам окончательной оценки достоверно лучшие показатели по селектируемым признакам и свойствам в сравнении с контролем. Таким образом, в таежной зоне для формирования набора ПД сосны и ели в целях закладки ЛСП I,5 порядка потребуется испытание потомств в течение 30–35 лет, а ЛСП II – 40–60 лет. Немаловажным аспектом является также требование закладывать многокლოновые ЛСП I,5 и ЛСП с общим числом клонов и схемами смешения, аналогичными ЛСП I (приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 20 октября 2015 г. № 438 «Об утверждении Правил создания и выделения объектов лесного семеноводства»). В свете современных достижений селекционной науки и практики стран Северной Европы такие

требования выглядят излишне жесткими. Определенные в нормативно-справочной документации сроки и схемы испытаний требуют настолько больших финансовых, трудовых и временных затрат, что надежды на их реализацию в обозримом будущем практически нет.

Наблюдаемая «пестрая» картина в структуре ЕГСК отдельных субъектов округа и планируемых показателей свидетельствует, по всей видимости, об отсутствии в Министерстве природных ресурсов и экологии РФ и Рослесхозе специализированного подразделения, ответственного вместе с соответствующим отраслевым научно-исследовательским институтом за разработку и реализацию селекционных программ и генеральных схем развития селекционного семеноводства.

Заключение

В настоящей обзорной статье проанализирована информация, характеризующая современный уровень и перспективы развития лесной селекции и селекционного семеноводства в ряде стран Северной Европы (Швеция и Финляндия) и в европейской части РФ в границах Северо-Западного федерального округа. В рамках вопроса о лесной селекции рассматриваются теоретические и практические аспекты реализации тех или иных селекционных стратегий (программ); о селекционном семеноводстве – то же, но в отношении программ закладки лесосеменных плантаций.

В странах Северной Европы в настоящее время анализируются итоги выполнения в течение последних 40–50 лет долгосрочных селекционных работ по основным породам-лесообразователям. В Швеции и Финляндии за указанный период полностью завершён первый (базовый) цикл плюсовой селекции и активно осуществляются работы по реализации второго цикла. В аспекте селекционного семеноводства это означает постепенный вывод из эксплуатации лесосеменных плантаций I порядка и замену их на лесосеменные плантации повышенной генетической ценности – I,5 и II порядков. В лесоводственном отношении к 2050 г. эффект селекционной работы оценивается на уровне 20–25 % увеличения продуктивности вновь создаваемых искусственных древостоев по запасу стволовой древесины. Следует особо отметить, что за рассматриваемый период значительное развитие получила научно-методическая основа лесной селекции. Существенное ускорение селекционного процесса ожидается за счет широкого использования методов биотехнологии.

Лесные планы субъектов Северо-Западного федерального округа РФ свидетельствуют, что в настоящее время на их территории не реализуются и не планируются к выполнению в ближайшей перспективе скоординированные на отраслевом общероссийском уровне программы по селекции и семеноводству сосны и ели. Проведенные в последней трети XX столетия успешные и местами достаточно масштабные работы по фенотипическому отбору в естественных насаждениях плюсовых деревьев и закладке лесосеменных плантаций I порядка не привели к завершению даже первого (начального) цикла плюсовой селекции. В результате выполнения данного начального цикла должна была быть сформирована селекционная популяция I и заложены необходимые площади мультипликационных популяций повышенной генетической ценности – I,5 порядка. Достичь указанных целей во многих субъектах Северо-Западного федерального округа невозможно по причине недостаточного количества

отобранных плюсовых деревьев, а главное – крайне малой площади испытательных культур. Подавляющее большинство первоначально отобранных плюсовых деревьев остаются не проверенными по потомству, что блокирует возможность дальнейшего развития системы плюсовой селекции.

Нельзя не отметить полное отсутствие в России селекционного районирования основных лесобразующих пород, которое бы регулировало проведение селекционных работ и использование семян с лесосеменных плантаций. Существующее общее лесосеменное районирование не может быть применено для этих целей. Сделанные выводы не внушают оптимизма и позволяют спрогнозировать серьезные проблемы в плане обеспечения современных тепличных комплексов для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой улучшенными семенами хвойных видов.

Однако достичь целей устойчивого развития отраслей лесного комплекса, как на национальном, так и на региональном уровнях, возможно путем перехода на интенсивный путь ведения лесного хозяйства. Важнейшим компонентом такого хозяйства является развитая система искусственного лесовосстановления, базирующаяся на селекционно-генетической основе. Последнее означает, что никакие вопросы, связанные с повышением устойчивости и производительности вновь создаваемых насаждений, не могут быть решены без учета происхождения и наследственных свойств семян культивируемых лесных пород. Поэтому в России органам государственной власти, уполномоченным в области лесных отношений, и крупным арендаторам лесного фонда придется вернуться к решению вопросов обеспечения системы искусственного лесовосстановления генетически улучшенными семенами и посадочным материалом.

Для достижения прогресса в этом необходимо: разработать федеральную программу по сохранению и рациональному использованию лесных генетических ресурсов РФ; в рамках данной программы создать ряд подпрограмм по генетическим исследованиям и селекции важнейших видов-лесообразователей с учетом современных достижений в области молекулярной генетики и биотехнологии; разработать генеральную схему селекционного семеноводства основных лесобразующих пород. В практическом плане прежде всего потребуются возобновить работы по отбору плюсовых деревьев и организовать на современной методической основе селекционно-генетическую оценку всех имеющихся клоновых потомств ПД, представленных на лесосеменных плантациях I порядка. Выполнение указанных работ позволит в перспективе перейти к реализации той или иной избранной стратегии долговременной селекции конкретного вида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авров Ф.Д. Эколого-генетические основы устойчивости популяций и плантационного выращивания лиственницы в Сибири: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 1998. 36 с.

Avrov F.D. *Ecological and Genetic Bases of Stability of Larch Populations and Plantation Cultivation in Siberia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 1998. 36 p. (In Russ.).

2. Веняляйнен М. Долгосрочная программа по селекции сосны обыкновенной в Финляндии // Лесная генетика, селекция и физиология древесных растений: материалы Междунар. симп. 25–30 сент. 1989 г. Воронеж. М., 1990. С. 9–16.

Venyalyaynen M. Long-Term Breeding Program for Scots Pine in Finland. *Forest Genetics, Breeding and Physiology of Woody Plants: Proceedings of the International Symposium, September 25–30, 1989, Voronezh*. Moscow, 1990, pp. 9–16. (In Russ.).

3. Гроздова Н.Б., Кабанова Е.Д. Результаты гибридизационных работ с пихтой и лжетсугой в Ивантеевском дендросаду ВНИИЛМ // Разработка основ систем селекции древесных пород: тез. докл. совещ. Ч. II. Рига, 1981. С. 24–27.

Grozдова N.B., Kabanova E.D. Results of Hybridization Work with Fir and Douglas Fir in the Ivanteevsky Dendrological Garden of VNIILM. *Development of the Foundations of Tree Breeding Systems: Abstracts of the Meeting Reports. Part II*. Riga. 1981, pp. 24–27. (In Russ.).

4. Коски В. Семенное районирование в Финляндии // Лесовосстановление на Европейском Севере: материалы фин.-рос. семинара по лесовосстановлению. 28 сент.–2 окт. 1998 г. Вантаа: Науч. центр Вантаа, 2000. С. 127–132. (Бюл. НИИ леса Финляндии; 772/2000).

Koski V. Seed Zoning in Finland. *Forest Regeneration in the Northern Part of Europe: Proceedings of the Finnish-Russian Seminar. September 28 – October 2, 1998. Bull. For. Res. Inst. Finland*. Vantaa, 2000, no. 772, pp. 127–132. (In Russ.).

5. Лаур Н.В. Лесной генетико-селекционный комплекс Карелии (особенности создания, анализ состояния, научное обоснование развития): дис. ... д-ра с.-х. наук. Петрозаводск, 2012. 429 с.

Laur N.V. *Forest Genetic and Breeding Complex of Karelia (Creation Features, State Analysis and Development Scientific Rationale)*: Dr. Agric. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2012. 429 p. (In Russ.).

6. Лесной план Архангельской области: утв. указом губернатора Архангельской обл. от 14.12.2018 № 116-у. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/462641881> (дата обращения: 10.10.22).

Forest Plan of the Arkhangelsk Region: Approved by the Decree of the Governor of the Arkhangelsk Region Dated December 14, 2018 No. 116-y. (In Russ.).

7. Лесной план Вологодской области: утв. распоряжением губернатора Вологодской обл. от 30.11.2018 № 4807-р. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/444924654> (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Vologda Region: Approved by the Order of the Governor of the Vologda Region Dated November 30, 2018 No. 4807-p. (In Russ.).

8. Лесной план Калининградской области: утв. указом губернатора Калининградской обл. от 30.03.2009 № 27. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/3900201812310001> (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Kaliningrad Region: Approved by the Decree of the Governor of the Kaliningrad Region Dated March 30, 2009 No. 27. (In Russ.).

9. Лесной план Ленинградской области на 2019–2028 гг. Режим доступа: <https://lenobl.ru/media/docs/15987/Лесной%20план%20Ленинградской%20области.pdf> (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Leningrad Region for 2019–2028: Approved by the Resolution of the Governor of the Leningrad Region Dated December 25, 2018 No. 75-пг. (In Russ.).

10. Лесной план Мурманской области: утв. постановлением губернатора Мурманской обл. от 20.03.2019 № 29-ПГ. Режим доступа: <https://mpr.gov-murman.ru/documents/lesplan/> (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Murmansk Region: Approved by the Resolution of the Governor of the Murmansk Region Dated March 20, 2019 No. 29-ПГ. (In Russ.).

11. Лесной план Новгородской области: утв. указом губернатор Новгородской обл. от 28.12.2018 № 576. Режим доступа: https://priroda.novreg.ru/tinybrowser/files/dokumenty/lesnoi_plan/01/lesplan-2019.pdf (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Novgorod Region: Approved by the Decree of the Governor of the Novgorod Region Dated December 28, 2018 No. 576. (In Russ.).

12. Лесной план Псковской области: утв. указом губернатора Псковской области от 29.12.2018 № 81-УГ. Режим доступа: <https://priroda.pskov.ru/lesnoy-plan> (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Pskov Region: Approved by the Decree of the Governor of the Pskov Region Dated December 29, 2018 No. 81-УГ. (In Russ.).

13. Лесной план Республики Карелия: утв. распоряжением главы Респ. Карелия от 24.12.2018 № 731-р. Режим доступа: https://gov.karelia.ru/upload/iblock/ffb/12_2_562_704.pdf (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Republic of Karelia: Approved by the Order of the Head of the Republic of Karelia Dated December 24, 2018 No. 731-p. (In Russ.).

14. Лесной план Республики Коми: утв. распоряжением главы Респ. Коми от 01.05.2020 № 106-р. 2020. Режим доступа: <https://mpr.rkomi.ru/dokumenty/lesnoy-plan-respubliki-komi-na-2020--2029-gg> (дата обращения: 11.10.22).

Forest Plan of the Komi Republic: Approved by the Order of the Head of the Komi Republic Dated May 1, 2020 No. 106-p. (In Russ.).

15. 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 Trial Plantations in Gene-Ecological Studies in the European North*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 308 p. (In Russ.).

16. Раевский Б.В. Географические культуры сосны обыкновенной в Российской Карелии // Лесовосстановление на Европейском Севере: материалы фин.-рос. семинара по лесовосстановлению. 28 сент.–2 окт. 1998 г. Вантаа: Науч. центр Вантаа, 2000. С. 105–111. (Бюл. НИИ леса Финляндии; 772/2000).

Raevsky B.V. Scots Pine Provenance Trial in the Republic of Karelia. *Forest Regeneration in the Northern Part of Europe: Proceedings of the Finnish-Russian Seminar. September 28 – October 2, 1998. Bull. For. Res. Inst. Finland. Vantaa. 2000, no. 772, pp. 105–111. (In Russ.).*

17. Раевский Б.В., Ильинов А.А. Рост и сохранность географических культур различных видов ели в Карелии // Лесн. хоз-во. 2002. № 6. С. 37–39.

Raevsky B.V., Ilinov A.A. Growth and Preservation of Provenance Trial Plantations of Spruce Species in Karelia. *Lesnoye khozyaystvo*, 2002, no. 6, pp. 37–39. (In Russ.).

18. Рогозин М.В. Уроки истории лесной селекции // Лесн. хоз-во. 2013. № 6. С. 20–23.

Rogozin M.V. Lessons of the History of Forest Breeding. *Lesnoye khozyaystvo*, 2013, no. 6, pp. 20–23. (In Russ.).

19. Смилга Я.Я. Повышение быстроты роста и улучшение качества древесины осины путем гибридизации в Латвии // Разработка основ систем селекции древесных пород: тез. докл. совещ. Ч II. Рига, 1981. С. 24–27.

Smilga Ya.Ya. Increasing the Growth Rate and Improving the Quality of Aspen Wood through Hybridization in Latvia. *Development of the Foundations of Tree Breeding Systems: Abstracts of the Meeting Reports. Part II*. Riga, 1981, pp. 24–27. (In Russ.).

20. Тараканов В.В., Паленова М.М., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Третьякова Р.А. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) // Лесохоз. информ. 2021. № 1. С. 100–143.

Tarakanov V.V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tretyakova R.A. Forest Tree Breeding in Russia: Achievements, Challenges, Priorities (Overview). *Forestry information*, 2021, no. 1, pp. 100–143. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.09>

21. Туркин А.А. Испытание потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной (на примере Республики Коми): автореф. дис. ... канд. с-х. наук. Архангельск, 2007. 20 с.
Turkin A.A. *Testing the Offspring of Scots Pine Plus Trees (Case Study of the Komi Republic)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Syktyvkar, 2007. 20 p. (In Russ.).
22. Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации / Федер. служба лесн. хоз-ва России. М., 2000. 198 с.
Guidelines for Forest Seed Production in the Russian Federation. Federal Forestry Service of Russia. Moscow, 2000. 198 p. (In Russ.).
23. Царев А.П., Лаур Н.В., Царев В.А., Царева Р.П. Современное состояние лесной селекции в Российской Федерации: тренд последних десятилетий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 38–55.
Tsarev A.P., Laur N.V., Tsarev V.A., Tsareva R.P. The Current State of Forest Breeding in the Russian Federation: The Trend of Recent Decades. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 6, pp. 38–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-38-55>
24. Чумакова Н.И. Усовершенствование технологии вегетативного размножения хвойных растений методом черенкования // Изв. ТСХА. 2011. № 5. С. 161–164.
Chumakova N.I. Improving the Vegetative Propagation Technology of Coniferous Plants by Cuttings. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2011, no. 5, pp. 161–164. (In Russ.).
25. Calleja-Rodriguez A., Pan J., Funda T., Chen Z., Baisou J., Isik F., Abraamsson S., Wu H.X. Evaluation of the Efficiency of Genomic versus Pedigree Predictions for Growth and Wood Quality Traits in Scots Pine. *BMC Genomics*, 2020, vol. 21, art. 796. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07188-4>
26. Chamberland V., Robichaud F., Perron M., Gélinas N., Bousquet J., Beaulieu J. Conventional versus Genomic Selection for White Spruce Improvement: A Comparison of Costs and Benefits of Plantations on Quebec Public Lands. *Tree Genetics & Genomes*, 2020, vol. 16, art. 17. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1409-7>
27. Chen Z.-Q., Baisou J., Pan J., Karlsson B., Andersson B., Westin J., García-Gil M.R., Wu H.X. Accuracy of Genomic Selection for Growth and Wood Quality Traits in Two Control-Pollinated Progeny Trials Using Exome Capture as the Genotyping Platform in Norway Spruce. *BMC Genomics*, 2018, vol. 19, art. 946. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5256-y>
28. Danell Ö. Possible Gains in Initial Stages of National Tree Breeding Programmes Using Different Techniques. *Forest Tree Improvement*, 23. København, DSR Forlag, 1990, pp. 11–30.
29. Danell Ö. Survey of Past, Current and Future Swedish Forest Tree Breeding. *Silva Fennica*, 1991, vol. 25, no. 4, art. 5463. <https://doi.org/10.14214/sf.a15621>
30. Danell Ö. Breeding Programmes in Sweden. 1. General Approach. *Progeny Testing and Breeding Strategies: Proceedings of the Nordic Group of Tree Breeders*. Ed. by S.J. Lee. Scotland, Forestry Authority, 1993, pp. 80–94.
31. Dietrichson J. Summary of Studies on Genetic Variation in Forest Trees Grown in Scandinavia with Special Reference to the Adaptation Problem. *Norway Skogforsoksv Medd*, 1971, no. 29, pp. 21–59.
32. Egertsdotter U., Ahmad I., Clapham D. Automation and Scale up of Somatic Embryogenesis for Commercial Plant Production, with Emphasis on Conifers. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10, art. 109. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00109>
33. Eriksson G., Ekberg I. *An Introduction to Forest Genetics*. Uppsala, SLU Repro, 2001. 166 p.
34. Forest Tree Seed and Seedling Production. *Finnish Food Authority*. Available at: <https://www.ruokavirasto.fi/en/farmers/plant-production/forest-tree-seed-and-seedling-production/> (accessed 22.02.22).
35. Giertych M. Summer of Results on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Height Growth in IUFRO Provenance Experiments. *Silvae Genetica*, 1979, vol. 28, no. 4, pp. 136–152.

36. Giertych M. *Report on the IUFRO 1938 and 1939 Provenance Experiments on Norway Spruce (Picea abies (L.) Karst.)*. Kórnik, ID PAN, 1984. 179 p.
37. Giertych M., Oleksyn J. Studies on Genetic Variation in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Coordinated by IUFRO. *Silvae Genetica*, 1992, vol. 41, no. 3, pp. 133–143.
38. Haapanen M., Jansson G., Nielsen U.B., Steffenrem A., Stener L.-G. *The Status of Tree Breeding and Its Potential for Improving Biomass Production*. Skogforsk, Uppsala, 2015. 56 p. Available at: <http://www.skogforsk.se/contentassets/9d9c6eeaf374a2283b2716e4d8d552e/the-status-of-tree-breeding-low.pdf> (accessed 25.03.21).
39. Hazubska-Przybył T., Wawrzyniak M.K., Kijowska-Oberc J., Staszak A.M., Ratajczak E. Somatic Embryogenesis of Norway Spruce and Scots Pine: Possibility of Application in Modern Forestry. *Forests*, 2022, vol. 13, iss. 2, art. 155. <https://doi.org/10.3390/f13020155>
40. Högberg K.-A., Hajek J., Gailis A., Stenvall N., Zarina I., Teivonen S., Aronen T. Practical Testing of Scots Pine Cutting Propagation – A Joint Metla-Skogforsk-Silava Project. *BMC Proceedings*, 2001, vol. 5, art. P129. <https://doi.org/10.1186/1753-6561-5-S7-P129>
41. Jansson G., Danell O., Stener L.-G. Correspondence between Single-Tree and Multiple-Tree Plot Genetic Tests for Production Traits in *Pinus sylvestris*. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, vol. 28, no. 3, pp. 450–458. <https://doi.org/10.1139/x98-004>
42. Jansson G., Danusevičius D., Grotehusman H., Kowalczyk J., Krajmerova D., Skrøppa T., Wolf H. Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H.Karst.). *Forest Tree Breeding in Europe*. Ed. by L. Pâques. Dordrecht, Springer, 2013, vol. 25, pp. 123–176. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6146-9_3
43. Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The Genetic and Economic Gains from Forest Tree Breeding Programmes in Scandinavia and Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 32, iss. 4, pp. 273–286. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1242770>
44. Krakau U.-K., Liesebach M., Aronen T., Lelu-Walter M.-A., Schneck V. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forest Tree Breeding in Europe*. Dordrecht, Springer, 2013, vol. 25, pp. 267–323. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6146-9_6
45. Lebedev V.G., Lebedeva T.N., Chernodubov A.I., Shestibratov K.A. Genomic Selection for Forest Tree Improvement: Methods, Achievements and Perspectives. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 11, art. 1190. <https://doi.org/10.3390/f11111190>
46. Lelu-Walter M.-A., Thompson D., Harvengt L., Sanchez L., Toribio M., Pâques L.E. Somatic Embryogenesis in Forestry with a Focus on Europe: State-of-the-Art, Benefits, Challenges and Future Direction. *Tree Genetics & Genomes*, 2013, vol. 9, pp. 883–899. <https://doi.org/10.1007/s11295-013-0620-1>
47. Lenz P.R.N., Nadeau S., Mottet M.-J., Perron M., Isabel N., Beaulieu J., Bousquet J. Multi-Trait Genomic Selection for Weevil Resistance, Growth, and Wood Quality in Norway Spruce. *Evolutionary Applications*, 2020, vol. 13, iss. 1, pp. 76–94. <https://doi.org/10.1111/eva.12823>
48. Lindgren D., Karlsson B., Andersson B., Prescher F. Swedish Seed Orchards for Scots Pine and Norway Spruce. *Seed Orchards: Proceedings from a Conference at Umeå, Sweden, September 26–28, 2007*. Umea, 2008, pp. 142–153.
49. Lindquist B. *Forstgenetik in schwedischen Waldbaupraxis*. Radebene und Berlin, Neumann Verlag, 1954. 156 p. (In Swedish).
50. Namkoong G. A Control Concept of Gene Conservation. *Silvae Genetica*, 1984, vol. 33, no. 4-5, pp. 160–163.
51. Nikkanen T. A Review of Scots Pine and Norway Spruce Seed Orchards in Finland. *Seed Orchards: Proceedings from a Conference at Umeå, Sweden, September 26–28, 2007*. Umea, 2008, pp. 195–198.
52. Park Y.-S., Beaulieu J., Bousquet J. Multi-Varietal Forestry Integrating Genomic Selection and Somatic Embryogenesis. *Vegetative Propagation of Forest Trees*. Ed. by Y.-S. Park, J.M. Bonga, H.-K. Moon. Seoul, NIFoS, 2016, pp. 302–322.

53. Rosvall O. *Review of the Swedish Tree Breeding Program*. Uppsala, Skogforsk, 2011. 84 p.
54. Rosvall O. Using Norway Spruce Clones in Swedish Forestry: General Overview and Concepts. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, iss. 5, pp. 336–341. <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1614659>
55. Rosvall O., Mullin T. Introduction to Breeding Strategies and Evaluation of Alternatives. *Best Practice for Tree Breeding in Europe*. Ed. by T.J. Mullin, S. Lee. Uppsala, Skogforsk, 2013, pp. 7–28.
56. Ruotsalainen S. *Managing Breeding Stock in the Initiation of a Long-Term Tree Breeding Program*. Academic Dissertation. Finnish Forest Research Institute. Helsinki, Hakapaino Oy, 2002. 95 p.
57. Ruotsalainen S., Persson T. Scots Pine – *Pinus sylvestris* L. *Best Practice for Tree Breeding in Europe*. Ed. by T.J. Mullin, S. Lee. Uppsala, Skogforsk, 2013, pp. 49–65.
58. Sorensson C. Varietal Pines Boom in the US South. *New Zealand Journal of Forestry*, 2006, vol. 51, no. 2, pp. 34–40.
59. Sutton B. Commercial Delivery of Genetic Improvement to Conifer Plantations Using Somatic Embryogenesis. *Annals of Forest Science*, 2002, vol. 59, no. 5-6, pp. 657–661. <https://doi.org/10.1051/forest:2002052>
60. *Swedish Forest Statistics*. Skogsstyrelsen. (In Swedish). Available at: <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/> (accessed 28.02.22).
61. Välimäki S., Paavilainen L., Tikkinen M., Salonen F., Varis S., Aronen T. Production of Norway Spruce Embryos in a Temporary Immersion System (TIS). *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 2020, vol. 56, iss. 4, pp. 430–439. <https://doi.org/10.1007/s11627-020-10068-x>
62. Westin J., Haapanen M. Norway Spruce – *Picea abies* (L.) Karst. *Best Practice for Tree Breeding in Europe*. Ed. by T.J. Mullin, S. Lee. Uppsala, Skogforsk, 2013, pp. 29–49.

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

Научная статья
УДК 630*52:630*174.754
DOI:10.37482/0536-1036-2022-6-38-54

Разработка модели биомассы *Picea L.* и *Abies L.* для региональных условий Евразии

В.А. Усольцев^{1,2✉}, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID*: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

И.С. Цепордей¹, *канд. с.-х. наук, науч. сотр.*; *ResearcherID*: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

И.М. Данилин³, *д-р с.-х. наук, проф.*; *Researcher ID*: [AAS-4960-2020](https://orcid.org/0000-0001-9706-6927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9706-6927>

¹Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; usoltsev50@mail.ru✉, ivan.tsepordey@yandex.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; usoltsev50@mail.ru

³Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН, Академгородок, д. 50, г. Красноярск, Россия, 660036; danilin@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 15.01.21 / Одобрена после рецензирования 20.04.21 / Принята к печати 23.04.21

Аннотация. Лесные экосистемы играют большую роль в стабилизации климата, и непрерывный мониторинг их биомассы имеет первостепенное значение. Технология бортового лазерного сканирования получила широкое распространение при оценке биомассы деревьев за счет дистанционной регистрации таких таксационных показателей деревьев и древостоев, как ширина и площадь проекции кроны, высота дерева и древостоя. В работе использована авторская база эмпирических данных 1550 модельных деревьев ели *Picea L.* и 535 пихты *Abies L.* Евразии. База данных содержит сведения о высоте дерева, ширине и длине кроны, биомассе ствола, листвы, ветвей и корней. Выявлено, что наибольшую информативность имеют 2-факторные аллометрические модели компонентов биомассы, включающие в качестве независимых переменных ширину кроны и высоту дерева. Для всех компонентов биомассы установлена положительная связь с шириной кроны и высотой дерева. На статистически достоверном уровне биомасса компонентов одинаковых по размеру деревьев пихты на 45–71 % больше, чем у ели. Это можно объяснить тем, что при одной и той же высоте дерева ширина кроны у пихты на 11 % меньше по сравнению с елью. Оценен вклад зимних температур и осадков в изменчивость компонентов биомассы. Биомасса всех компонентов равновеликих деревьев описывается пропеллерообразной 3D-зависимостью. В теплых регионах при повышении количества осадков биомасса увеличивается, по мере перехода к холодным регионам зависимость характеризуется противоположным или нейтральным трендом. С ростом температуры во влажных регионах биомасса становится больше, по мере перехода в сухие условия – меньше. Включение в аллометрическую модель длины кроны как дополнительной независимой переменной практически не улучшило ее прогностическую способность. Вклад таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных в объяснение изменчивости компонентов биомассы составляет соответственно 72,9; 13,5 и 13,6 %. Климатические переменные в наибольшей



степени объясняют изменчивость биомассы стволов и надземной биомассы (от 18 до 20 %), в наименьшей степени – хвои и ветвей (от 8 до 9 %). Полученные результаты могут быть полезны при лазерном мониторинге биомассы лесов и прогнозировании возможных изменений структуры биомассы деревьев в случае климатических отклонений.

Ключевые слова: гидротермические градиенты, компоненты биомассы, лазерное зондирование деревьев, аллометрические модели, средняя температура января, годовое количество осадков, ель, пихта

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания FEUZ-2021-0014.

Для цитирования: Усольцев В.А., Цепордей И.С., Данилин И.М. Разработка модели биомассы *Picea L.* и *Abies L.* для региональных условий Евразии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 38–54. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-38-54>

Original article

Designing a Model of the *Picea L.* and *Abies L.* Biomass for Regional Climatic Conditions in Eurasia

Vladimir A. Usoltsev^{1,2✉}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Ivan S. Tsepordey², Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

Igor M. Danilin³, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAS-4960-2020](https://orcid.org/0000-0001-9706-6927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9706-6927>

¹Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202 a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; usoltsev50@mail.ru✉, ivan.tsepordey@yandex.ru

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

³V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; danilin@ksc.krasn.ru

Received on January 15, 2021 / Approved after reviewing on April 20, 2021 / Accepted on April 23, 2021

Abstract. Forest ecosystems play a major role in climate stabilization, and continuous monitoring of their biomass is of paramount importance. Airborne laser scanning technology has become widespread in assessing tree biomass by remote sensing of such inventory indices of trees and stands as crown width and projection area, tree and stand height. The work uses the author's observation database of 1550 model trees of spruce (*Picea L.*) and 535 model trees of fir (*Abies L.*) growing in Eurasia. The database provides information on tree height, crown width and length, as well as biomass of trunk, foliage, branches and roots. It was found that two-factor allometric models of biomass components, including crown width and tree height as independent variables, are the most informative. A positive correlation with crown width and tree height has been identified for all biomass components. Biomass of components of similar-sized fir trees was found to be 45–71 % higher than that of spruce at the statistically reliable level. This is possibly due to the fact that with the same height the crown width of the fir is 11 % less compared to the spruce. The contribution of winter temperatures and precipitation to the variability of biomass components was estimated. The biomass of all components of equal-sized trees is described by a propeller-like 3D dependence. In warm regions, the biomass increases with increasing precipitation; the dependence is characterized

by an opposite or neutral trend with the transition to cold regions. The biomass increases with increasing temperature in humid regions, and decreases with the transition to dry climatic conditions. Inclusion of crown length as an additional independent variable in the allometric model practically did not improve its predictive ability. The contribution of inventory indices of trees, their species, and climatic variables to explaining the variability of biomass components is 72.9, 13.5 and 13.6 %, respectively. Climatic variables explain most of the variability in trunk and above-ground biomass (18 to 20 %), least of all in needles and branches (8 to 9 %). The findings can be useful for laser monitoring of forest biomass and predicting possible changes in tree biomass structure in case of climatic deviations.

Keywords: hydrothermal gradients, biomass components, LiDAR sensing of trees, allometric models, mean January temperature, annual precipitation, spruce, fir

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment FEUZ-2021-0014.

For citation: Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Danilin I.M. Designing a Model of the *Picea L.* and *Abies L.* Biomass for Regional Climatic Conditions in Eurasia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 38–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-38-54>

Введение

Глобальные леса содержат около 80 % углерода всей наземной биомассы, это превышает его содержание в атмосфере [22]. В течение последних двух 10-летий для оценки наземной биомассы интенсивно используется технология активного бортового лазерного зондирования, обеспечивающая получение высокоточной информации о пространственных и темпоральных характеристиках лесов. Появился принципиально новый лазерно-локационный метод съемки лесного полога, позволяющий обрабатывать огромные массивы данных (в сотни гигабайт) лазерного зондирования в режиме реального времени практически одновременно с выполнением измерений, причем не только всего лесного покрова в целом, но и отдельных деревьев [4].

Благодаря способности проникновения лазерного луча сквозь толщу полога данные зондирования, представляющие 3-мерные облака точек, дают подробную 3D-картину структуры леса, позволяют выполнять идентификацию отдельных деревьев, включая нижний ярус, и получать их таксационные характеристики. Точность картирования существенно повышается при совмещении бортового и наземного лазерного сканирования [20].

При использовании дистанционных методов ширина кроны и высота дерева всегда были основными показателями для оценки лесных ресурсов [6]. В ходе исследований по Международной биологической программе для сосны обыкновенной 3 климатических зон Сибири были предложены зависимости биомассы кроны от ее ширины [5]. Хотя методы дистанционного зондирования отдельных деревьев менее разработаны по сравнению с методами традиционной наземной таксации, за последние годы достигнуты существенные успехи в области индивидуального обнаружения деревьев и регистрации формы и структуры кроны (ширина кроны, высота дерева, площадь проекции и объем кроны) на основе новых высокопроизводительных алгоритмов и применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [24].

До недавнего времени при традиционной таксации надземную биомассу оценивали по ее аллометрической зависимости от диаметра ствола на высоте груди (далее – диаметр ствола) [32]. С целью повышения точности оценок биомассы в аллометрическое уравнение стали включать вторую независимую переменную – высоту дерева [10]. Проанализировав мировые данные о надземной биомассе древостоев, М. Cannell [15] установил, что при одних и тех же диаметре ствола и высоте дерева надземная биомасса может быть разной, особую сложность представляют древесные виды с развитой кроной. Тем не менее характеристики кроны только недавно начали включать в структуру аллометрической модели [19].

В тропических лесах на массу кроны приходится почти половина надземной биомассы дерева. Поэтому используемые для тропических лесов аллометрические уравнения, которые включают высоту деревьев, но не учитывают размеров кроны, занижают биомассу деревьев на 11–14 %. При этом ширина кроны может обладать большей способностью объяснять изменчивость надземной биомассы (10,5 %) по сравнению с высотой дерева (6,0 %) [19]. Диаметр ствола в качестве независимой переменной в аллометрической модели для тропических лесов Южной Америки объяснил 87 % изменчивости надземной биомассы деревьев. Включение в модель базисной плотности и ширины кроны в качестве дополнительных независимых переменных повысило коэффициент детерминации до 93 %. Ширина кроны может обладать высокой информативностью не только в тропических лесах, кустарниковых сообществах и редколесьях, но и в бореальных лесах Европы, например, для сосны обыкновенной аллометрия «масса хвои – ширина кроны» деревьев объясняет до 85 % изменчивости биомассы хвои [31].

Ширина кроны применялась при оценке надземной биомассы многоствольных деревьев и кустарников вместо диаметра ствола, поскольку в подобных случаях диаметр ствола оказывался трудно измеряемым и недостаточно информативным. В частности, для саксаульников (*Haloxylon Bunge*), произрастающих в пустынях Средней Азии, были разработаны аллометрические модели связи надземной биомассы с высотой дерева (куста) и шириной кроны [3]:

$$\ln P_n = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{кр}, \quad (1)$$

где a_0 , a_1 и a_2 – регрессионные коэффициенты; P_n – надземная биомасса дерева, кг; H – высота дерева, м; $D_{кр}$ – ширина кроны, м.

Позднее по данным надземной биомассы 2635 деревьев саксаула, взятых на 100 пробных площадях в пустынях Казахстана, по формуле (1) рассчитаны модели с коэффициентами детерминации от 0,841 до 0,854, предназначенные как для дистанционной, так и для наземной инвентаризации саксауловых сообществ [7]. Для мангровых (*Aegiceras corniculatum*) лесов Китая, в которых деревья часто представлены многоствольными «кустами», уравнение имеет другую структуру [18]:

$$\ln P_n = a_0 + a_1 \ln(D_{кр}^2 H) \quad (2)$$

с коэффициентом детерминации 0,993. Для одноствольных деревьев *Kandelia candel* аналогичное уравнение (2) характеризовалось меньшим коэффициентом детерминации – 0,847 [18].

Первоначально наземная инвентаризация лесов часто проводилась с помощью аллометрических уравнений, включающих в качестве независимых

переменных диаметр ствола и высоту дерева. При переходе к лазерной таксации стали совмещать первые модели с моделями, полученными на основе данных лазерного зондирования. Так, для еловых древостоев (*Picea crassifolia* Kom.) Китая была построена модель

$$D = a_0 + a_1 H + a_2 CPA, \quad (3)$$

где D – диаметр ствола, см; CPA – площадь проекции кроны, м²; $R^2 = 0,514$; стандартная ошибка (SE) – 5,82 [17].

Полученная модель (3) далее совмещена с ранее опубликованными моделями для массы стволов, ветвей, хвои и генеративных органов *Picea crassifolia*. Опубликованные модели имели вид

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln(D^2 H), \quad (4)$$

где P_i – биомасса i -го компонента, кг.

Модели (3) и (4) являются связанными (рекурсивными), применимыми для оценки компонентов биомассы деревьев ели как при наземной таксации, так и при лазерном зондировании. Значения компонентов биомассы получали путем подстановки модели (3) в модель (4).

В одной из новейших работ [21] было поставлено целью выяснить, можно ли при помощи двух независимых переменных ($D_{кр}$ и H) объяснить значительную долю изменчивости надземной биомассы деревьев, не используя диаметр ствола в качестве независимой переменной. Сформирована база данных о 2395 модельных деревьях 127 семейств, охватывающих все планетарные биомы. Модель (1) сопоставлена по информативности с предложенной авторами [21] моделью, включающей комбинированную переменную ($HD_{кр}$) в качестве независимой переменной:

$$\ln P_n = a_0 + a_1 \ln(HD_{кр}). \quad (5)$$

Установлено, что модель (5) лучше объясняет изменчивость биомассы по сравнению с моделью (1).

Для проверки гипотезы о возможности оценки биомассы деревьев без замера диаметра ствола предложена вспомогательная модель [18]:

$$\ln D = a_0 + a_1 \ln(HD_{кр}). \quad (6)$$

Затем уравнение (6) подставлено в модель Дж. Чейва [16] для надземной биомассы деревьев тропических лесов, в которой D является одной из независимых переменных. Сопоставлена ошибка этой 2-ступенчатой системы уравнений с ошибкой, полученной по уравнению (5), и сделан вывод в пользу модели (5). Таким образом, авторы получили положительный ответ на вопрос, можно ли при оценке биомассы деревьев не измерять диаметр ствола [21]. Позднее предложен улучшенный вариант модели определения надземной биомассы без замера диаметра ствола с применением технологии БПЛА, в основу которой положена теория пайп-модели [24].

Включение в аллометрические модели биомассы температуры и осадков в качестве дополнительных независимых переменных существенно улучшило точность оценок и дало возможность прогнозирования изменений биомассы при климатических сдвигах [34]. Однако модели были разработаны для надземной биомассы деревьев в целом, без деления ее на компоненты, и не учитывали вклада климатических переменных в ее изменчивость.

Темнохвойные леса бореальной зоны на больших площадях представлены смешанными елово-пихтовыми древостоями: ель (*Picea* L.) и пихта (*Abies* L.) обычно растут совместно с преобладанием того или другого вида. В результате сравнительного исследования биологической продуктивности ельников с примесью пихты (с долей участия ели от 60 до 90 %) и пихтарников с примесью ели (с долей участия пихты от 60 до 90 %) на Среднем Урале (окрестности г. Нижние Серги) не было выявлено статистически значимого различия тех и других в возрастном диапазоне от 20 до 130 лет и выведено общее уравнение для оценки надземной биомассы обеих пород по известному возрасту древостоев с коэффициентом детерминации 0,895 [9].

По данным 303 и 100 пробных площадей соответственно ели и пихты, заложенных на территории Северной Евразии, установлено, что при одних и тех же запасах стволовой древесины надземная и общая биомасса ельников превышает биомассу пихтарников в молодняках на <50 % и в спелом возрасте на <17 % [8]. Затем была сформирована дополненная база данных о биомассе ели и пихты для всей Евразии, включающая соответственно 670 и 255 пробных площадей. Результат сопоставления двух видов оказался прямо противоположным: при одних и тех же запасах стволовой древесины надземная и общая биомасса пихтарников превысила биомассу ельников соответственно на 8–14 % и 7–11 % [29]. Таким образом, на уровне древостоев в одном случае различий двух видов по биомассе нет, в другом биомасса ели превышает биомассу пихты, а в третьем, наоборот, биомасса пихты больше биомассы ели.

Подобная неопределенность имеется и на уровне отдельных деревьев. На основе сформированной базы данных о фитомассе 926 и 109 модельных деревьев соответственно ели и пихты, произрастающих в лесах Евразии, установлено, что у деревьев разного вида, равных возраста и размеров нет статистически значимых различий как по абсолютной величине биомассы, так и по фракционной (компонентной) структуре [11]. Другой результат получен на Среднем Урале. Была определена структура надземной биомассы 34 и 32 модельных деревьев соответственно ели и пихты, взятых в спелых смешанных елово-пихтовых древостоях, и установлено, что надземная биомасса всех компонентов у деревьев ели выше, чем у пихты, при одинаковых размерах деревьев [9]. В обоих случаях размеры кроны не вводились в модели биомассы в качестве независимой переменной, т. к. они не предназначались для дистанционного лазерного зондирования.

Таким образом, как на уровне древостоев, так и на уровне деревьев нет окончательного вывода о наличии или отсутствии различий в структуре биомассы ели и пихты.

В данном исследовании мы ставим перед собой следующие задачи: на основе ранее опубликованных работ выбрать независимые переменные (таксационные показатели деревьев), наиболее подходящие для дистанционного зондирования биомассы деревьев; по сформированной базе данных о биомассе деревьев ели и пихты Евразии выделить структуру модели, которая была бы наиболее информативной при оценке компонентов биомассы; установить наличие/отсутствие статистически значимых различий биомассы деревьев ели и пихты; выяснить, как компоненты биомассы соотносятся с таксационными показателями деревьев и колебаниями температуры и осадков на

территории Евразии; выявить вклад в объяснение изменчивости компонентов биомассы таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных.

Объекты и методы исследования

Для решения поставленных задач мы использовали авторскую базу эмпирических данных о биомассе лесообразующих пород Евразии, содержащую сведения о 15 200 деревьях [28]. Из базы данных отобрана информация о 1550 и 535 модельных деревьях соответственно *Picea* L. и *Abies* L. с замеренными таксационными и биопродукционными параметрами (табл. 1). Род *Picea* L. представлен в основном видами *P. abies* (L.) H. Karst. и *P. obovata* Ledeb., в меньшей мере – видами *P. schrenkiana* F. et M., *P. ajanensis* (Lindl. et Gord.) Fisch. ex Carr., *P. koraiensis* Nakai. и *P. purpurea* Mast. Род *Abies* L. – в основном видами *A. sibirica* L. и *A. alba* Mill., в меньшей мере – *A. veitchii* Lindl., *A. holophylla* Maxim. и *A. nephrolepis* Maxim. Обработка экспериментального материала выполнена в программе Statgraphics.

Таблица 1

Статистики анализируемых параметров деревьев ели и пихты
Statistics of analyzed indices of spruce and fir trees

Статистический показатель	Параметры деревьев							
	H	$L_{кр}$	$D_{кр}$	P_c	P_v	P_x	P_n	P_k
<i>Picea</i>								
Mean	13,8	7,9	2,7	136,4	20,4	12,6	168,1	24,8
Min	0,43	0,70	0,25	0,005	0,001	0,004	0,011	0,003
Max	44,8	29,5	10,9	4122,0	1259,6	305,0	5089,0	444,6
SD	9,3	4,6	1,5	337,7	59,3	26,1	413,0	58,3
CV, %	67,6	58,8	55,8	247,6	291,0	206,9	245,7	234,7
n	1415,0	1185,0	963,0	1327,0	1542,0	1549,0	1331,0	403,0
<i>Abies</i>								
Mean	12,8	9,3	3,0	139,1	24,0	16,5	183,4	32,3
Min	0,13	0,39	0,25	0,0002	0,0001	0,0004	0,0006	0,16
Max	32,7	23,8	9,3	2133,0	465,4	1063,8	2468,4	315,3
SD	8,3	4,6	1,8	231,4	48,3	50,0	299,7	55,2
CV, %	65,4	49,1	58,4	166,4	201,1	303,1	163,5	170,6
n	541,0	378,0	302,0	535,0	517,0	517,0	517,0	62,0

Примечание: Mean, Min и Max – соответственно среднее, минимальное и максимальное значения; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений; H – высота дерева, м; $L_{кр}$, $D_{кр}$ – соответственно длина и диаметр кроны, м; P_c , P_v , P_x , P_n , P_k – соответственно биомасса ствола в коре, ветвей, хвои, надземная биомасса и биомасса корней в абсолютно сухом состоянии, кг.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании анализа работ [3, 18, 21] мы пришли к выводу, что наиболее информативными независимыми переменными при оценке биомассы деревьев путем дистанционного зондирования являются ширина кроны и высота дерева. При этом не требуется замер диаметра ствола. Ответ на 1-й вопрос нашего исследования получен.

Для ответа на 2-й и 3-й вопросы мы рассчитали 4 вида моделей:

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln D_{\text{кр}}) + a_2 X; \quad (7)$$

$$\ln P_i = a_0 + a_1[\ln(D_{\text{кр}}^2 H)] + a_2 X; \quad (8)$$

$$\ln P_i = a_0 + a_1[\ln(D_{\text{кр}} H)] + a_2 X; \quad (9)$$

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln D_{\text{кр}}) + a_2(\ln H) + a_3 X. \quad (10)$$

С целью установления различия ели и пихты по биомассе деревьев (или его отсутствия) в моделях (7)–(10) в качестве дополнительной независимой переменной введена бинарная переменная X , которой кодируются данные по ели ($X = 1$) и пихте ($X = 0$). Результаты расчета по моделям показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета по уравнениям (7)–(10)
Calculation results according to equations (7)–(10)

Показатель	Зависимые переменные			
	$\ln P_e$	$\ln P_x$	$\ln P_v$	$\ln P_n$
Модель (7)				
a_0^*	1,5566	0,3707	-0,1774	2,0135
$\ln D_{\text{кр}}$	3,3778	2,3737	2,9892	3,0903
X	-1,1023	-0,7738	-0,6432	-0,9758
adjR ²	0,755	0,752	0,815	0,775
SE	1,22	0,83	0,85	1,05
Модель (8)				
a_0	-0,8331	-0,9166	-1,7638	-0,0295
$\ln(D_{\text{кр}}^2 H)$	1,1386	0,7581	0,9452	1,0291
X	-0,6856	-0,5758	-0,3994	-0,6058
adjR ²	0,912	0,843	0,901	0,916
SE	0,73	0,66	0,62	0,64
Модель (9)				
a_0	-1,6454	-1,3172	-2,2355	-0,7099
$\ln(D_{\text{кр}} H)$	1,6387	1,0691	1,3277	1,4741
X	-0,5298	-0,5045	-0,3130	-0,4699
adjR ²	0,950	0,853	0,905	0,947
SE	0,55	0,64	0,61	0,51
Модель (10)				
a_0	-2,4868	-1,3403	-2,1151	-1,2477
$\ln D_{\text{кр}}$	0,6372	1,0378	1,4914	0,8174
$\ln H$	2,3019	1,0895	1,2215	1,9091
X	-0,3502	-0,5000	-0,3362	-0,3521
adjR ²	0,970	0,853	0,906	0,957
SE	0,42	0,64	0,61	0,46

Примечание: * – свободный член здесь и далее скорректирован на логарифмическое преобразование по G. Baskerville [12]; adjR² – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных.

Коэффициент детерминации показывает, что адекватность сравниваемых моделей последовательно повышается в направлении от (7) к (10) и наибольшей информативностью обладает модель (10). В моделях (8) и (9) переменные вследствие их перемножения жестко связаны между собой и их совместный эффект характеризуется одним общим регрессионным коэффициентом. Скорее всего, ортогональность переменных, введенных в модель (10) по отдельности, обеспечивает большую ее пластичность благодаря тому, что каждая из переменных характеризуется своим регрессионным коэффициентом. Так, мы получили ответ на 2-й вопрос исследования. Необходимо отметить, что сказанное противоречит выводу Т. Jucker с соавторами [21]. Причина может быть в том, что исходные данные [21] взяты по хвойным и лиственным древесным и кустарниковым видам в целом, а не отдельно для каждого вида.

Бинарная переменная X в моделях (7)–(10) значима на уровне $p < 0,001$. Она имеет знак «–». Это означает, что при одной и той же высоте дерева и ширине кроны биомасса всех надземных компонентов у пихты существенно больше, чем у ели. Согласно регрессионным коэффициентам при бинарной переменной X , в наиболее информативной модели (10) биомасса хвои, ветвей, ствола и надземная биомасса у деревьев пихты больше по сравнению с деревьями ели одинаковых размеров соответственно на 65, 40, 42 и 42 %.

По-видимому, в совокупности всех видов в пределах рода *Abies* деревья имеют более узкую крону в сравнении с *Picea*, а поскольку мы сопоставляем ель и пихту при равенстве как высоты дерева, так и ширины кроны, то у деревьев пихты оказывается больше концентрация биомассы. Это предположение подтвердилось после расчета по уравнению связи ширины кроны с высотой дерева для елей и пихт:

$$\ln D_{кр} = -0,4490 + 0,5559(\ln H) + 0,1066X; \text{adj}R^2 = 0,683; \text{SE} = 0,33. \quad (11)$$

Оказалось, что при одинаковой высоте дерева ширина кроны у пихты на 11 % уже, чем у ели, и это различие статистически значимо ($t = 4,8 > t_{999} = 3,29$).

Полученное на трансконтинентальном уровне соотношение биомассы деревьев ели и пихты мы проверили на локальном уровне. Для этого использовали опубликованные фактические данные 28 деревьев ели европейской и пихты белой в елово-пихтовом древостое вблизи г. Галлен в Швейцарских Альпах [14]. Хотя Н. Burger [14] не увидел различий между биомассой кроны у елей и пихт, его вывод не был подтвержден статистическим анализом. Мы обработали данные модельных деревьев Н. Burger методом множественного регрессионного анализа и в диапазоне диаметров ствола от 10 до 30 см получили следующую зависимость:

$$\ln P_{кр} = -2,5560 + 0,6818(\ln CPA) + 1,8858(\ln H) - 0,1184X; \text{adj}R^2 = 0,983; \text{SE} = 0,08, \quad (12)$$

где $P_{кр}$ – биомасса кроны дерева в абсолютно сухом состоянии, кг.

Как и в сопоставлении биомассы ели и пихты на трансконтинентальном уровне, в модели (12) бинарная переменная имеет знак «–», $p < 0,01$. Наш вывод, объясняющий наличие большей биомассы деревьев у пихты, чем у ели, более узкой кроной у первой, подтверждается закономерностью, полученной нами по данным Н. Burger:

$$\ln CPA = -1,5718 + 1,7717(\ln D) - 0,6736(\ln H) + 0,2164X; \text{adj}R^2 = 0,968; \text{SE} = 0,11. \quad (13)$$

Согласно этой закономерности, площадь проекции кроны у одинаковых по размеру деревьев пихты на 24 % меньше, чем у ели.

Для ответа на 4-й вопрос данные о географических координатах модельных деревьев нанесены на карты средней январской температуры (https://store.mapsofworld.com/image/cache/data/map_2014/currents-and-temperature-jan-enlarge-900x700.jpg) и среднегодовых осадков (<http://www.mapmost.com/world-precipitation-map/free-world-precipitation-map/>) [33] (рис. 1 и 2) и одновременно совмещены с таксационными и биопродукционными показателями деревьев в одной общей матрице, которая включена затем в процедуру регрессионного анализа [30]. Отказ от использования средней годовой температуры в пользу средней температуры января был обоснован ранее [30].

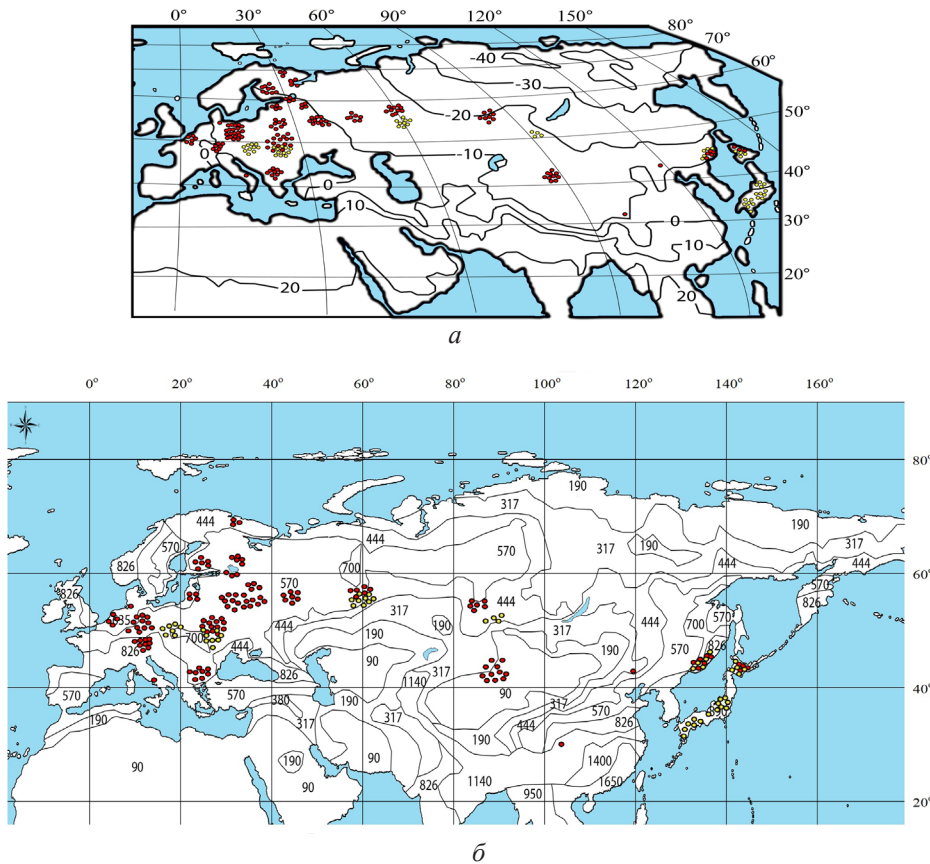


Рис. 1. Распределение фактических данных биомассы 1550 и 535 соответственно еловых (красные кружки) и пихтовых (желтые кружки) модельных деревьев: *a* – на карте январских изотерм, °C; *б* – на карте среднегодовых осадков, мм [33]

Fig. 1. Distribution of the biomass measurement data of 1550 and 535 of spruce (red circles) and fir (yellow circles) model trees, respectively: *a* – map of January isotherms, °C; *b* – map of annual average precipitation, mm [33]

На основе проведенного анализа предложена структура модели, включающая в качестве независимых переменных как морфометрические характеристики деревьев, так и климатические показатели:

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln D_{\text{кр}}) + a_2(\ln H) + a_3 X + a_4[\ln(T + 40)] + a_5(\ln PR) + a_6[\ln(T + 40)](\ln P), \quad (14)$$

где T – средняя температура января, °С; PR – среднегодовое количество осадков, мм; $[\ln(T + 40)](\ln PR)$ – комбинированная переменная, характеризующая совместное действие температур и осадков.

Поскольку средняя температура января в высоких широтах характеризуется отрицательной величиной, для ее логарифмирования в модели (14) она приведена к виду $(T + 40)$.

Количество фактических данных о биомассе корней ели и пихты соответственно в 3 и 8 раз меньше по сравнению с данными о надземной биомассе (см. табл. 1). Подобная диспропорция характерна для известных баз данных о биомассе деревьев и древостоев [28, 30]. Из 403 деревьев ели с измеренной биомассой корней только у 180 деревьев были измерены длина и ширина кроны, а из 62 деревьев пихты – только у 16. Соответственно в расчет моделей (7)–(10) и (14) для биомассы корней пихты могли войти только 16 деревьев, что не обеспечивает устойчивость модели. По причине недостаточной представленности данных о биомассе корней мы рассчитали по модели (14) относительный показатель, а именно P_k/P_n , и связали оба вида в одной общей модели путем кодирования их бинарной переменной X . Результаты показаны в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета по модели (14)
Calculation results according to model (14)

Показатель	a_0	$\ln D_{кр}$	$\ln H$	X	$\ln(T+40)$	$\ln PR$	$[\ln(T+40)] \times \ln PR$	adjR ²	SE
$\ln P_c$	80,4957	0,7231	2,1980	-0,3844	-24,0290	-13,1746	3,8212	0,973	0,41
$\ln P_x$	20,7811	1,1945	0,9296	-0,5375	-4,7868*	-3,9223	0,8962*	0,859	0,63
$\ln P_b$	25,6569	1,6146	1,1015	-0,3743	-6,7182	-4,6792	1,1580	0,908	0,60
$\ln P_n$	64,8856	0,9295	1,7764	-0,3851	-18,8002	-10,6358	3,0344	0,960	0,44
$\ln P_k/P_n$	0,4556	–	–	-0,1196	-0,5358	–	–	0,104	0,25

*Регрессионные коэффициенты не значимы на уровне $p < 0,05$.

Все регрессионные коэффициенты, представленные в табл. 3, достоверны на уровне $p < 0,001$, за исключением двух для биомассы хвои ($t = 1,2/1,5 < 1,96$). В модели для P_k/P_n оказались значимыми лишь регрессионные коэффициенты при X ($t = 2,4 > t_{98} = 2,33$) и при $\ln(T + 40)$ ($t = 6,7 > t_{99} = 3,29$).

Геометрическая интерпретация (рис. 2) данных, рассчитанных по (14), для биомассы ели получена путем подстановки в (14) средних значений H и $D_{кр}$ для ели. Здесь нами взята ель, потому что данные по ней по сравнению с пихтой представлены в значительно большем количестве.

Согласно рис. 2, зависимость всех компонентов биомассы одинаковых по размеру деревьев ели от температур и осадков описывается пропеллерообразной 3D-поверхностью. В холодных регионах при увеличении количества осадков биомасса снижается, но по мере перехода к теплым регионам зависимость характеризуется противоположным или нейтральным трендом. С ростом температуры во влажных регионах биомасса увеличивается, но по мере перехода в сухие условия снижается или не реагирует на изменение температуры. Графики, показанные на рис. 2 для биомассы хвои, ветвей, стволов и надземной биомассы

ели, отличаются от аналогичных графиков для пихты (не показаны) лишь тем, что 3D-поверхности для пихты сдвинуты вверх по оси ординат согласно расчету по (14) соответственно на 71, 45, 47 и 47 %.

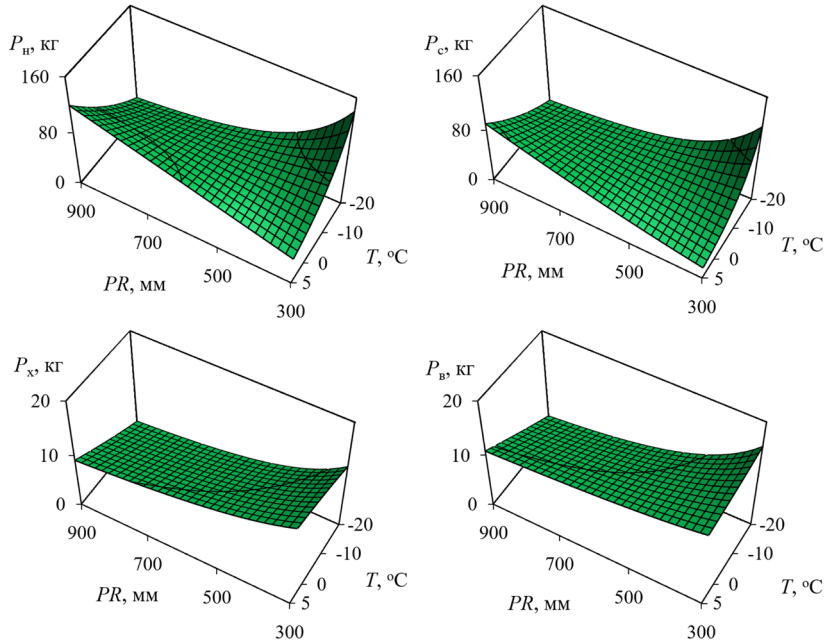


Рис. 2. Связь компонентов биомассы *Picea* L. со средней температурой января и средним количеством осадков

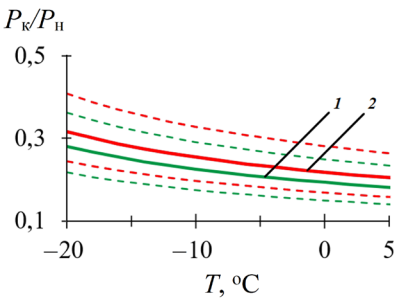
Fig. 2. Relationship of *Picea* L. biomass components with average January temperature and annual average precipitation (PR)

У других древесных видов, в частности двухвойных сосен, дуба и лиственницы, закономерности иногда отличаются по некоторым компонентам от представленных на рис. 2, а иногда противоположны по всем компонентам [30]. Вероятно, это связано с биологическими свойствами древесных видов и особенностями распределения ассимилятов дерева в различные его компоненты: ствол, ветви, хвою и корни [26].

Изменчивость отношения P_k/P_n объясняется независимыми переменными в наименьшей степени (10 %) по сравнению с компонентами надземной биомассы (86–97 %). Графическая интерпретация этой зависимости показана на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость отношения P_k/P_n еловых (1) и пихтовых (2) деревьев от средней температуры января. Сплошными линиями показаны средние значения регрессии, пунктирными – среднеквадратические отклонения

Fig. 3. Dependence of the P_k/P_n ratio (where P_n, P_k – above-ground and root biomass in absolute dry condition, respectively, kg) of spruce (1) and fir (2) trees on the average January temperature. The solid lines show the average regression values; the dotted lines show the standard deviations



Как и в публикации по биомассе двухвойных сосен [30], P_k/P_n еловых и пихтовых деревьев увеличивается по мере роста отрицательных температур января, т. е. в направлении высоких широт.

В результате многофакторного регрессионного анализа получен ответ на 5-й вопрос. В табл. 4 мы видим, что средние вклады таксационных показателей деревьев, видовой принадлежности и климатических переменных в изменчивость компонентов биомассы составляют соответственно 72,9; 13,5 и 13,6 %. Климатические переменные в наибольшей степени объясняют изменчивость биомассы стволов и надземной биомассы (от 18 до 20 %) и в наименьшей степени – хвои и ветвей (от 8 до 9 %).

Таблица 4

Вклад независимых переменных при расчете по модели (14) в объяснение изменчивости зависимых переменных, %
Contribution of the independent variables of equations calculated according to model (14) for the variability explanation of dependent variables, %

Показатель	Независимые переменные							
	$\ln D_{кр}$	$\ln H$	$\ln D_{кр} + \ln H$	X	$\ln(T+40)$	$\ln PR$	$[\ln(T+40)] \times (\ln PR)$	$\ln(T+40) + \ln PR + [\ln(T+40)] (\ln PR)$
$\ln P_c$	13,9	56,3	70,2	9,8	6,6	6,7	6,7	20,0
$\ln P_x$	35,1	36,5	71,6	20,6	2,2	3,1	2,5	7,8
$\ln P_b$	41,2	37,6	78,8	12,5	2,6	3,3	2,8	8,7
$\ln P_n$	20,1	51,0	71,1	11,0	5,8	6,1	6,0	17,9
$X \pm \sigma$	27,6± ±12,7	45,4± ±9,8	72,9± ±4,0	13,5± ±4,9	4,3± ±2,2	4,8± ±1,9	4,5± ±2,2	13,6± ±6,2

Примечание: $X \pm \sigma$ – среднее значение \pm стандартное отклонение.

При наземном лазерном сканировании древостоя может быть получено значение длины кроны, которое при известном значении высоты дерева характеризует изменение биомассы дерева в связи с его физиологическим состоянием, ценотическим положением в пологе и густотой древостоя. При включении в 2-факторную аллометрическую модель надземной биомассы длины кроны в качестве третьей независимой переменной объяснительная способность модели повысилась с 78 до 84 %, т. е. на 6 % [27]. Мы ввели в модель (14) длину кроны в качестве дополнительной независимой переменной. Оказалось, что включение данного показателя в модель не повышает ее объяснительную способность или повышает на незначительную величину – от 0,4 до 2 %.

Деревья разных древесных пород обладают специфичной конфигурацией вертикального профиля. Эта специфика успешно фиксируется с помощью бортовых лазерных сенсоров. При множественной регистрации отраженных лазерных импульсов по характеру группировки точек профиля и его очертанию можно с точностью 95 % различать сосну, ель и мелколиственные породы. Сосна отличается от березы характерными сгущениями точек, а ель от других пород – формой кроны [23].

Эффективным дистанционным методом зондирования растительности является лазерный мониторинг состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения [2]. В частности, хвоя пихты баль-

замической (*Abies balsamea* (L.) Mill.) по сравнению с елью красной (*Picea rubens* Sarg.) характеризуется повышенными спектральной яркостью (45 % против 30 %) и отражательной способностью, что позволяет различать эти породы при дистанционном зондировании лесного полога [2].

При современных темпах развития лазерной и IT-техники следует ожидать, что в скором времени дистанционно можно будет различать при помощи лидара с низколетающего БПЛА такие внешне похожие виды, как ель и пихта: по спектральной яркости [1] и противоположной ориентации шишек [25]. Наземное лазерное устройство [13] позволит подтвердить данные с лидара по структуре коры ствола (шероховатой у ели и гладкой у пихты).

Выводы

1. При дистанционной оценке биомассы деревьев ширина кроны и высота дерева в аллометрических моделях являются основными независимыми переменными, с высокой точностью регистрируемыми бортовым лазерным сенсором.

2. Наибольшей объяснительной способностью ширина кроны и высота дерева характеризуются при их раздельном введении в аллометрическую модель биомассы в качестве независимых переменных.

3. На основе авторской базы данных о биомассе *Picea* L. и *Abies* L. Евразии установлено, биомасса деревьев пихты с равными шириной кроны и высотой дерева на 45–71 % больше, чем у ели. Это можно объяснить тем, что при одной и той же высоте дерева ширина кроны у пихты на 11 % меньше по сравнению с елью.

4. Введение в аллометрическую модель температуры и осадков в качестве дополнительных независимых переменных показало, что биомасса равных по размеру деревьев описывается пропеллерообразной 3D-зависимостью. В холодных регионах при повышении количества осадков биомасса снижается, по мере перехода к теплым регионам зависимость характеризуется противоположным или нейтральным трендом. С ростом температуры во влажных регионах биомасса увеличивается, по мере перехода в сухие условия постепенно снижается.

5. Средние вклады таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных в объяснение изменчивости компонентов биомассы составляют соответственно 72,9; 13,5 и 13,6 %.

6. Полученные результаты могут быть полезны при мониторинге биомассы лесов на основе лазерного зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белов С.В., Арцыбашев Е.С. Изучение отражательной способности древесных пород // Ботан. журн. 1957. Т. 42, № 4. С. 517–534.

Belov S.V., Artsybashev E.S. Studying the Reflectivity of Wood Species. *Botanicheskii Zhurnal*, 1957, vol. 42, no. 4, pp. 517–534. (In Russ.).

2. Белов М.Л., Фесенко Ю.С., Городничев В.А., Кувшинов А.В. Лазерный мониторинг состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 3. С. 1–17.

Belov M.L., Fesenko Yu.S., Gorodnichev V.A., Kuvshinov A.V. Laser Remote Sensing of Vegetation Cover Using Reflection Coefficients Measurement Data. *Radiooptics of the Bauman MSTU*, 2016, no. 3, pp. 1–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.7463/rdopt.0316.0840843>

3. Вейсов С., Каплин В.Г. К методике определения надземной фитомассы белого саксаула в Восточных Каракумах // Проблемы освоения пустынь. 1976. № 1. С. 60–64.

Veyisov S., Kaplin V.G. To the Method of Biomass Estimating in White Saxaul of the Eastern Kara-Kum Desert. *Problems of Desert Development*, 1976, no. 1, pp. 60–64. (In Russ.).

4. Данилин И.М., Медведев Е.М., Мельников С.Р. Лазерная локация Земли и леса. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. 182 с.

Danilin I.M., Medvedev E.M., Melnikov S.R. *Laser Scanning of the Earth and Forests*. Krasnoyarsk, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS Publ., 2005. 182 p. (In Russ.).

5. Поздняков Л.К., Протопопов В.В., Горбатенко В.М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: Кн. изд-во, 1969. 155 с.

Pozdnyakov L.K., Protoporov V.V., Gorbatenko V.M. *Biological Productivity of Forests in Middle Siberia and Yakutia*. Krasnoyarsk, Knizhnoye Izdatel'stvo, 1969. 155 p. (In Russ.).

6. Самойлович Г.Г. Применение авиации и аэрофотосъемки в лесном хозяйстве. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953. 476 с.

Samoylovich G.G. *The Use of Aerial Photography and Aviation in Forestry*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1953. 476 p. (In Russ.).

7. Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, 1988. 253 с.

Usoltsev V.A. *Growth and Structure of the Phytomass of Forest Stands*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 253 p. (In Russ.).

8. Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.

Usoltsev V.A. *Compiling Forest Biomass Data Banks*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 1998. 541 p. (In Russ.).

9. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 365 с.

Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bergman I.E. *Biological Productivity of Ural Forests under Conditions of Air Pollutions: An Investigation of a System of Regularities*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2012. 365 p. (In Russ.).

10. Усольцев В.А., Усольцева Р.Ф. Аппроксимирование надземной фитомассы березы и осины по диаметру и высоте ствола // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1977. № 7. С. 83–89.

Usoltsev V.A., Usoltseva R.F. Results of Approximating Birch and Aspen Aboveground Biomass on the Diameter and Height of a Tree Stem. *Vestnik sel'sko-khozyaystvennoy nauki Kazakhstana*, 1977, iss. 7, pp. 83–89. (In Russ.).

11. Усольцев В.А., Часовских В.П., Норитцин Д.В. Возрастная динамика и структура фитомассы деревьев ели и пихты в лесах Евразии // Эко-потенциал. 2015. № 4(12). С. 11–13.

Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P., Noritsin D.V. Age Dynamics and Structure of Spruce and Fir Tree Biomass in the Forests of Eurasia. *Eko-potentsial*, 2015, no. 4(12), pp. 11–13. (In Russ.).

12. Baskerville G.L. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2, no. 1, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1139/x72-009>

13. Blanchette D., Fournier R.A., Luther J.E., Côté J.-F. Predicting Wood Fiber Attributes Using Local-Scale Metrics from Terrestrial LiDAR Data: A Case Study of Newfoundland Conifer Species. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 347, pp. 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.013>
14. Burger H. Der Kronenaufbau gleichalteriger Nadelholzbestände. *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, 1939, vol. 21, iss. 1, pp. 5–57. (In Ger.).
15. Cannell M.G.R. Woody Biomass of Forest Stands. *Forest Ecology and Management*, 1984, vol. 8, iss. 3-4, pp. 299–312. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(84\)90062-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(84)90062-8)
16. Chave J., Réjou-Méchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C. et al. Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees. *Global Change Biology*, 2014, vol. 20, iss. 10, pp. 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
17. Fu L., Liu Q., Sun H., Wang Q., Li Z., Chen E., Pang Y., Song X., Wang G. Development of a System of Compatible Individual Tree Diameter and Aboveground Biomass Prediction Models Using Error-in-Variable Regression and Airborne LiDAR Data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 2, art. 325. <https://doi.org/10.3390/rs10020325>
18. Fu W., Wu Y. Estimation of Aboveground Biomass of Different Mangrove Trees Based on Canopy Diameter and Tree Height. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, vol. 10, part C, pp. 2189–2194. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.343>
19. Goodman R.C., Phillips O.L., Baker T.R. The Importance of Crown Dimensions to Improve Tropical Tree Biomass Estimates. *Ecological Applications*, 2014, vol. 24, iss. 4, pp. 680–698. <https://doi.org/10.1890/13-0070.1>
20. Hancock S., Anderson K., Disney M., Gaston K.J. Measurement of Fine-Spatial-Resolution 3D Vegetation Structure with Airborne Waveform Lidar: Calibration and Validation with Voxelised Terrestrial Lidar. *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 188, pp. 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.041>
21. Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F. et al. Allometric Equations for Integrating Remote Sensing Imagery into Forest Monitoring Programmes. *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, iss. 1, pp. 177–190. <https://doi.org/10.1111/gcb.13388>
22. Kindermann G.E., McCallum I., Fritz S., Obersteiner M. A Global Forest Growing Stock, Biomass and Carbon Map Based on FAO Statistics. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, no. 3, pp. 387–396. <https://doi.org/10.14214/sf.244>
23. Li J., Hu B., Noland T.L. Classification of Tree Species Based on Structural Features Derived from High Density LiDAR Data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, vol. 171-172, pp. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.012>
24. Machimura T., Fujimoto A., Hayashi K., Takagi H., Sugita S. A Novel Tree Biomass Estimation Model Applying the Pipe Model Theory and Adaptable to UAV-Derived Canopy Height Models. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 2, art. 258. <https://doi.org/10.3390/f12020258>
25. Neuville R., Bates J.S., Jonard F. Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 3, art. 352. <https://doi.org/10.3390/rs13030352>
26. Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How Does Biomass Allocation Change with Size and Differ among Species? An Analysis for 1200 Plant Species from Five Continents. *New Phytologist*, 2015, vol. 208, iss. 3, pp. 736–749. <https://doi.org/10.1111/nph.13571>
27. Ubuy M.H., Eid T., Bollandsås O.M., Birhane E. Aboveground Biomass Models for Trees and Shrubs of Enclosures in the Drylands of Tigray, Northern Ethiopia. *Journal of Arid Environments*, 2018, vol. 156, pp. 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.05.007>

28. Usoltsev V.A. *Single-Tree Biomass Data for Remote Sensing and Ground Measuring of Eurasian Forests*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31984.00001>
29. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Triple Harmonization of Transcontinental Allometric of *Picea* spp. and *Abies* spp. Forest Stand Biomass. *Ecology, Environment and Conservation*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 1966–1972. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36459345> (accessed 23.04.21)
30. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Tsepordey I.S., Ahrari A., Zhang M., Shoaib A.A., Chasovskikh V.P. Are There Differences in the Response of Natural Stand and Plantation Biomass to Changes in Temperature and Precipitation? A Case for Two-Needled Pines in Eurasia. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 331–341. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2020.04.001>
31. Vanninen P., Ylitalo H., Sievänen R., Mäkelä A. Effects of Age and Site Quality on the Distribution of Biomass in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 1996, vol. 10, iss. 4, pp. 231–238. <https://doi.org/10.1007/BF02185674>
32. West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology. *Science*, 1997, vol. 276, iss. 5309, pp. 122–126. <https://doi.org/10.1126/science.276.5309.122>
33. World Weather Map. *Maps of World*. Available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather> (accessed 23.04.21)
34. Zeng W.S., Duo H.R., Lei X.D., Chen X.Y., Wang X.J., Pu Y., Zou W.T. Individual Tree Biomass Equations and Growth Models Sensitive to Climate Variables for *Larix* spp. in China. *European Journal of Forest Research*, 2017, vol. 136, pp. 233–249. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1024-9>

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

Научная статья

УДК 630*12;581.543

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-55-70

Цифровое сканирование роста и развития древесных растений

А.В. Кабонен[✉], аспирант; ResearcherID: [AAV-7277-2021](https://orcid.org/0000-0002-1717-3085),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1717-3085>

О.И. Гаврилова, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

И.Т. Кищенко, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-1083-2019](https://orcid.org/0000-0002-1039-1020),

ORCID: [http://orcid.org/0000-0002-1039-1020](https://orcid.org/0000-0002-1039-1020)

Петрозаводский государственный университет, ул. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; alexkabonen@mail.ru[✉], ogavril@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.20 / Одобрена после рецензирования 28.03.21 / Принята к печати 30.03.21


Аннотация. Представлены фотометрическое устройство и методика, позволяющие в полевых условиях с максимальными детализацией и точностью быстро фиксировать характеристики органов или частей древесных растений в процессе их роста. Методика апробирована при изучении сезонной динамики интродуцированного в условия средней тайги вида *Viburnum lantana* L. и вида местной флоры *V. opulus* L. Показано, что в ритмике сезонной динамики видов есть отличия, связанные с влиянием текущего и предшествующего состояний окружающей среды. Наибольшая зависимость наступления начала роста и основного числа фенодат наблюдается от температуры воздуха. Выявлено, что раннее начало и окончание вегетации свойственны *V. opulus*. Рост и развитие *V. lantana* происходят при более теплой погоде. Побеги *V. opulus* начинают расти 18–21 мая, через 11 сут. рост отмечается у *V. lantana*. Побеги *V. opulus* прекращают расти 19 июня, побеги *V. lantana* – на 7 сут. позже. Наиболее длинные побеги текущего года (101 мм) формируются у *V. lantana*, это на 26 мм больше, чем у *V. opulus*. Начало роста побегов у *V. opulus* отмечается при среднесуточной температуре воздуха +4,7 °C и сумме положительных температур 187 °C, у *V. lantana* данный процесс начинается соответственно при +8,8 °C и 308 °C, причем для начала роста виду требуется 6 дн. со среднесуточной температурой выше +10 °C. Таким образом, изучаемые виды рода *Viburnum* можно условно разделить на 2 категории: рано (*V. opulus*) и поздно (*V. lantana*) начинающие и заканчивающие сезонное развитие. Культивируемый в таежную зону *V. lantana* относится к высокоперспективным видам интродуцентов, поэтому он может быть рекомендован для введения в культуру ценозы и озеленения населенных пунктов таежной зоны.

Ключевые слова: фенология растений, *Viburnum*, *Viburnum opulus*, *Viburnum lantana*, сезонное развитие древесных растений, прирост побегов, методика измерения древесных растений

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия в рамках Программы поддержки прикладных научных исследований и разработок студентов и аспирантов ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет».

Для цитирования: Кабонен А.В., Гаврилова О.И., Кищенко И.Т. Цифровое сканирование роста и развития древесных растений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 55–70. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-55-70>

© Кабонен А.В., Гаврилова О.И., Кищенко И.Т., 2022

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

Original article

Digital Scanning of Woody Plant Growth and Development

Alexey V. Kabonen[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [AAV-7277-2021](https://orcid.org/0000-0002-1717-3085),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1717-3085>

Olga I. Gavrilova, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

Ivan T. Kishchenko, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [AAC-1083-2019](https://orcid.org/0000-0002-1039-1020),

ORCID: [http://orcid.org/0000-0002-1039-1020](https://orcid.org/0000-0002-1039-1020)

Petrozavodsk State University, ul. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; alexkabonen@mail.ru[✉], ogavril@mail.ru

Received on December 26, 2020 / Approved after reviewing on March 28, 2021 / Accepted on March 30, 2021

Abstract. The paper presents a photometric device and a procedure for quickly recording the characteristics of organs or parts of woody plants during their growth in the field conditions with maximum detail and accuracy. The procedure was tested in the study of seasonal dynamics of *Viburnum lantana* L. introduced in Middle Taiga and a species of local flora *V. opulus* L. The research results show that there are differences in the species seasonal dynamics rhythm associated with the influence of the current and previous environmental conditions. Air temperature explains the greatest dependence of the beginning of growth and the majority of phenodates. It was found that early beginning and end of vegetation is typical for *V. opulus*. The growth and development of the introduced *V. lantana* occur in a warmer environment. Shoots of *V. opulus* begin to grow on May 18–21, after 11 days growth is observed in *V. lantana*. The earliest terms of shoot growth cessation were found in *V. opulus* (June 19); *V. lantana* shoot growth ends 7 days later. The longest shoots of the current year (101 mm) were formed in *V. lantana*, which is 26 mm longer than in *V. opulus*. The beginning of shoots growth in *V. opulus* is observed at +4.7 °C average daily air temperature and the sum of positive temperatures 187 °C, in *V. lantana* this process begins at +8.8 °C and 308 °C, respectively, and the species requires 6 days with average daily temperature above +10 °C to start growing. Thus, the studied *Viburnum* species can be conditionally divided into 2 groups: early (*V. opulus*) and late (*V. lantana*) beginning and ending seasonal development. Cultivated in the taiga zone *V. lantana* belongs to the highly promising introduced species, so it can be recommended for introduction into cultural cenoses and landscaping of settlements in the taiga zone.

Keywords: plant phenology, *Viburnum*, *Viburnum opulus*, *Viburnum lantana*, woody plant seasonal development, shoot growth, woody plant measurement procedure

Acknowledgments: The research was supported by the Karelia Innovation Business Startup MVP within the framework of the Program for Support of Applied Research and Development of Students and Postgraduate Students of the Petrozavodsk State University.

For citation: Kabonen A.V., Gavrilova O.I., Kishchenko I.T. Digital Scanning of Woody Plant Growth and Development. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 55–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-55-70>



Введение

Исследование процессов сезонного роста и развития биоты в пределах естественного ареала и при интродукции позволяет установить степень адаптации видов к новым условиям произрастания [16]. В последние 10-летия наблюдения за фенологическим развитием деревьев становятся актуальными и для установления реакции растений на происходящее изменение климата, которое может повлечь за собой перемены в практике интродукции из-за сдвигов границ зимних изотерм [18].

Методы исследований роста растений базируются на полевых измерениях. Для изучения сезонной динамики стеблей (побегов) их приросты измеряют сантиметровой линейкой [12]. При замерах динамики длины и диаметра плодов и шишек используют штангенциркуль [6]. Изучение роста листовых пластинок по площади основаны на их оконтуривании планиметром [7]. При исследованиях (фенологических), не требующих проведения измерений, применяют методику визуального осмотра [3] и рекомендации по унификации наблюдений [11]. Данные методы сбора информации являются классическими и используются продолжительное время.

Трудоемкость и отсутствие единообразия в методиках препятствуют изучению сезонной динамики растений и нередко делают невозможным сопоставление результатов исследований разных авторов. При механическом контакте с измеряемыми органами могут происходить их повреждения, отражающиеся на течении естественных процессов. В настоящее время появились новые возможности наблюдения за древесными растениями, обеспечивающие благодаря развитию методов неразрушающей оцифровки, основанных на применении сканирующих устройств (фотоаппаратов), максимальную детализацию и точность, позволяющие получить набор цифровых данных, что предоставляет возможность для всестороннего анализа. Например, Henke et. al. [19] с помощью переносного сканирующего устройства исследовали сезонный рост листовых пластинок тополя канадского (*Populus × canadensis* Moench) для последующего моделирования развития биомассы.

Цель – выявление оформившихся под влиянием метеорологических факторов закономерностей сезонной динамики местного вида *Viburnum opulus* L. и интродуцированного в условия Карельского таежного района вида *V. lantana* L. на основе применения неразрушающего цифрового сканирования органов растений в процессе их роста и развития.

Объекты и методы исследования

Экспериментальное исследование проводили в 2020 г. на территории арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (рис. 1). Объектами исследований служили калина обыкновенная, или красная (*Viburnum opulus*), и калина гордовина, или черная (*Viburnum lantana*), – абриген и интродуцент соответственно. Каждый вид в условиях Ботанического сада представлен групповой посадкой из 10 особей. Условия произрастания растений одинаковые. Характеристика объектов приведена в табл. 1. Фенологические наблюдения за видами осуществлялись в течение 10 предшествующих лет по общепринятой методике [3].

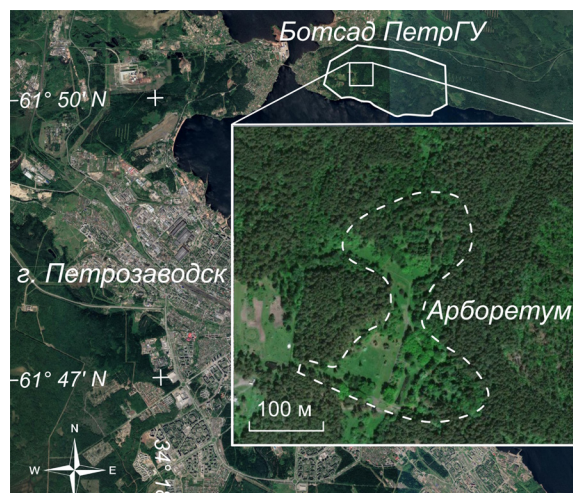


Рис. 1. Расположение арборетума Ботанического сада ПетрГУ

Fig. 1. Location of the PetrSU Botanical Garden

Таблица 1

Характеристика объектов исследований
Characteristics of research objects

Вид	Происхождение посадочного материала	Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр кроны, м
<i>Viburnum opulus</i>	–	39	3,4±0,6	2,9±0,5
<i>V. lantana</i>	Санкт-Петербург	37	2,8±0,4	2,1±0,3

Наблюдения за метеорологическими условиями 2020 г. проводили на метеостанции Davis Vantage Pro 2 Plus (США), установленной в 100 м западнее арборетума. Определяли температуру воздуха, °С (точность – 0,3 °С); интенсивность солнечного излучения, Вт/м² (точность – 5 %); относительную влажность воздуха, % (точность – 2 %). При анализе погодных условий за предшествующие 10 лет использовали данные Карельской гидрометеорологической обсерватории, расположенной в 7 км к юго-западу от Ботанического сада.

Для цифрового сканирования сезонных изменений растений было разработано переносное устройство (рис. 2), представляющее собой модернизированный аналог устройства, используемого в работе [19]. Устройство имеет жесткую и легкую переносную алюминиевую конструкцию в виде рамы 15×30 см. В ее передней части установлен экран с фоном из миллиметровой бумаги. Для удобства линейных расчетов обозначены красными линиями середина горизонтальной оси и начало оси вертикали (2 см от левого края). В процессе фотосканирования размеченные контуры служили ориентиром для прикладывания частей растений.

Для оцифровки органов растений в задней части рамы закреплена зеркальная камера (фотоаппарат Canon EOS 650D). Использовано полное разрешение изображения 5184×3456 пикс. В качестве преимуществ этой камеры можно отметить наличие 9-точечной системы автофокусировки по широкой зоне и высокие характеристики съемки при низкой освещенности, что помогало при фотофиксации растущих органов растений в естественной среде обитания (плохая освещенность, ветер). Такое устройство обеспечивало прочность конструкции, точность сбора данных и простоту использования, а также позволяло легко работать со снимками при их анализе.

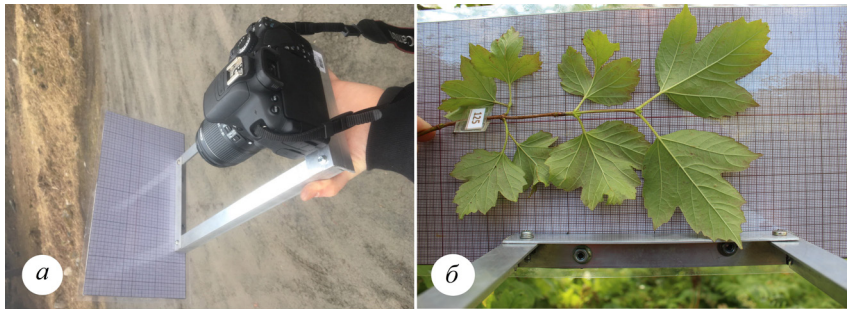


Рис. 2. Фотометрическое устройство: *a* – общий вид устройства; *б* – результат съемки *Viburnum opulus* при помощи устройства

Fig. 2. Photometric device: *a* – general view of the device; *б* – result of shooting *Viburnum opulus* with the device

Для получения представительной выборки при оцифровке сезонного роста отобрано по 20 побегов с почками у каждого растения. К выбранным побегам прикреплены бирки с номером. Цифровое сканирование произведено в течение периода вегетации: пронумерованные побеги фотографировали каждые 2–3 сут. – в результате получена 71 фотография, отражающая динамику изменений для всех исследуемых побегов. Данная методика позволила одновременно с ростом побегов фиксировать и фенологическое развитие растений, обеспечив комплексность сбора данных.

По результатам наблюдений за сезонной динамикой растений и метеорологическими условиями сформирована база данных, обработка материалов которой проведена с помощью рекомендуемых для этих целей методов статистического анализа [5]. Оценка перспективности интродукции древесных растений осуществлена по методике П.И. Лапина и С.В. Сидневой [8]. При этом учтены следующие показатели: степень ежегодного вызревания побегов, зимостойкость, сохранение габитуса, побегообразовательная способность, регулярность прироста осевых побегов, способность к генеративному развитию, возможность размножения в культуре, общая оценка перспективности.

Результаты исследования и их обсуждение

Рост растений. Статистическая обработка результатов наблюдений за ростом побегов показала, что ошибка определения среднеарифметической величины прироста составляет 3–4 %, а коэффициент вариации – 14–18 %. При сравнении начала роста побегов отдельных видов выяснилось, что ранний рост наблюдается у *V. opulus* (18–21 мая). Через 11 сут. рост отмечается и у *V. lantana*.

Физиологические реакции растений, в том числе и ростовые процессы, определяются диапазоном толерантности вида к факторам среды. Следовательно, установив значения факторов в ключевые периоды роста, а также направление, форму и силу связи между динамикой прироста и изменчивостью этих факторов, можно судить о степени их соответствия требованиям организма. При этом, как отмечалось авторами [17, 21], наиболее значимым фактором среды является температура воздуха. Начало роста побегов при среднесуточной температуре воздуха +4,7 °С отмечалось у *V. opulus*, у *V. lantana* рост начинался при 8,8 °С (рис. 3).

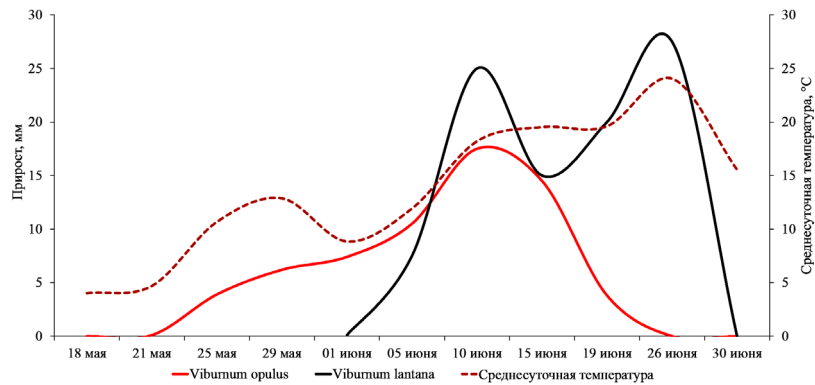


Рис. 3. Динамика суточного прироста побегов видов *Viburnum* и среднесуточной температуры воздуха

Fig. 3. Dynamics of daily shoot gain of *Viburnum* species and average daily air temperature

На жизнедеятельность растений оказывает влияние не только текущее, но и предшествующее состояние среды. Одним из параметров, позволяющим охарактеризовать тепловой режим среды за период с момента перехода температуры воздуха через отметку 0 °С до начала той или иной фазы, является среднесуточная сумма положительных температур воздуха. В период исследований 2020 г. она впервые была отмечена 1 апреля, однако начало роста исследуемых видов пришлось лишь на 18 мая (*V. opulus*) и 1 июня (*V. lantana*) при среднесуточной сумме положительных температур 187 и 308 °С соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Температурный режим в день начала роста побегов у видов *Viburnum*
Temperature regime on the start date of shoot growth in *Viburnum* species

Вид	Дата	СТ, °С	СПТ, °С	САТ, °С	СЭТ, °С	Количество суток с СТ выше +10 °С
<i>Viburnum opulus</i>	18–21 мая	4,7	187	105	82	0
<i>V. lantana</i>	1 июня	8,8	308	225	83	6

Примечание: СТ – среднесуточная температура; СПТ – сумма положительных температур; САТ – сумма активных температур; СЭТ – сумма эффективных температур.

Кроме того, потребность растений в тепле выражают среднесуточными суммами активных и эффективных температур. В фенологии растений среднесуточная сумма активных температур – это средняя за сутки температура воздуха, выше биологического минимума начала развития растения. Как правило, древесное растение начинает развиваться только при определенном уровне тепла – если среднесуточная температура воздуха превышает биологический минимум, который составляет для древесных растений, по мнению многих авторов, +5 °С [13]. В год исследования переход среднесуточной температуры воздуха через отметку +5 °С пришелся на 7 апреля, а для начала роста побегов *V. opulus* и *V. lantana* потребовались среднесуточные суммы активных температур 105 и 225 °С соответственно.

Выявленные значения позволили вычислить сумму эффективных температур (сумму среднесуточных температур, уменьшенных на значение биологического минимума), необходимую для начала роста. Оказалось, что суммы эффективных температур для исследуемых видов практически равны (82 и 83 °С для *V. opulus* и *V. lantana* соответственно). Разница в 11 дн. в наступлении начала роста объясняется неодинаковой реакцией растений на переход суммы среднесуточных температур через отметку +10 °С: *V. opulus* начал рост без перехода этой отметки, а интродуцированному виду *V. lantana* потребовалось несколько дней (с 25 по 30 мая) со среднесуточной температурой выше 10 °С, что, вероятно, и стало основным фактором, воздействующим на начало роста. Установленное влияние температурного режима воздуха предшествующего периода на начало роста вегетативных органов лиственных деревьев не противоречит выводам других авторов [1, 7, 13, 20].

Максимальный среднесуточный прирост побегов наблюдался у *V. opulus* 5–10 июня, а у *V. lantana* – спустя 10 сут. При этом величина максимального суточного прироста побегов у разных видов также варьировала в широких пределах (табл. 3): наибольшее значение (7,5 мм/сут.) обнаружено у *V. lantana*, у *V. opulus* этот показатель меньше на 30 % (5,8 мм/сут.).

Обнаружено, что требовательность изученных видов растений к температуре воздуха в период кульминации роста определяется в том числе и биологическими особенностями вида. Так, кульминация прироста побегов при температуре воздуха +19,6 °С зафиксирована у *V. opulus*, у *V. lantana* – при температуре на 4,4 °С выше. Авторы [16] также отмечают зависимость сроков кульминации прироста побегов различных видов растений от температурного режима окружающей среды. По нашим данным, к этому времени сумма среднесуточных температур повышается до 606–730 °С.

Сравнивая динамику роста, можно заметить сходство по этому показателю только до 15 июня. Далее интенсивность роста побегов *V. opulus* продолжала неуклонно уменьшаться, а у *V. lantana* следовала вторая стадия прироста. Подобная стадийность роста вполне объясняется динамикой температуры воздуха: 10–15 июня она снижалась, а с 16 июня начала резко увеличиваться (рис. 3). Изменения в сроках начала и окончания роста побегов отражались и на длительности их формирования. Наиболее продолжительный рост отмечен для *V. opulus* (30 сут.), а наименьший – для *V. lantana* (26 сут.) (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики прироста побегов у видов *Viburnum*
Characteristics of shoot gain in *Viburnum* species

Вид	Максимальный суточный прирост, мм	Годичный прирост, мм	Продолжительность роста, сут.
<i>Viburnum opulus</i>	5,8	75±15	30±4
<i>V. lantana</i>	7,5	100±26	26±3

Ранние сроки прекращения роста побегов характерны для *V. opulus* (19 июня), у *V. lantana* их рост заканчивался на 7 сут. позже (26 июня). Во время прекращения формирования побегов среднесуточная температура воздуха оставалась вполне благоприятной: +19,6...24,0 °С. Следовательно, для обоих изучаемых видов рода *Viburnum* тепла вполне достаточно для завершения годичного цикла развития вегетативных почек.

Определенная изменчивость в продолжительности и интенсивности роста побегов привела к соответствующим изменениям годичного прироста (табл. 3). Наиболее длинные побеги (101 мм) формируются у *V. lantana*, у *V. opulus* этот показатель составил 75 мм. Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что величина годичного прироста побегов обуславливается в первую очередь интенсивностью, а не продолжительностью роста. Так, длина побегов *V. lantana* больше, чем у *V. opulus*, на 35 %. При этом скорость роста у первого на 30 % выше, а продолжительность роста на 4 сут. меньше, чем у второго. Аналогичный вывод в отношении интродуцированных лиственных деревьев сделан и другими исследователями [24]. На рис. 4 показана сезонная динамика роста побегов исследуемых видов, выявленная методом цифрового сканирования.

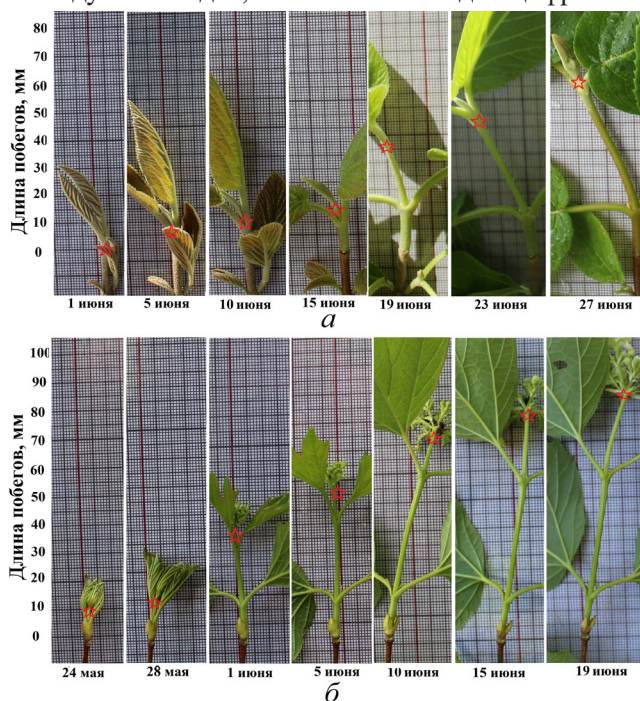


Рис. 4. Сезонная динамика роста побегов у видов *Viburnum*: а – *V. lantana*; б – *V. opulus*. Звездочкой обозначен конец прироста на момент сканирования

Fig. 4. Seasonal dynamics of shoot growth in *Viburnum* species: а – *V. lantana*; б – *V. opulus*. Star marks the growth end at the scanning time

Выяснилось, что между анализируемыми показателями и параметрами среды существует линейная корреляция. Корреляция экологических факторов и динамики приростов представлена в табл. 4. Влияние температуры воздуха на интенсивность роста побегов в течение всего периода роста прослеживается у *V. lantana* (см. рис. 3). У *V. opulus* такая зависимость наблюдалась только до момента кульминации прироста. Влажность воздуха оказывала существенное воздействие на интенсивность роста побегов у *V. opulus* и менее заметное – у *V. lantana*. Скорость роста побегов *V. opulus* положительно коррелировала с динамикой атмосферных осадков, а с солнечной радиацией – отрицательно. Последнее может свидетельствовать о том, что данный подлесочный вид относится к экологической группе сциофитов.

Таблица 4

Корреляционные показатели прироста побегов у видов *Viburnum*
Correlation indicators of shoot gain in *Viburnum* species

Фактор среды	<i>Viburnum opulus</i>			<i>Viburnum lantana</i>		
	r	t _{St}	Теснота связи	r	t _{St}	Теснота связи
Температура воздуха	+0,44	0,05	Умеренная	+0,90	0,60	Очень высокая
Влажность воздуха	+0,85	2,70	Высокая	+0,30	6,90	Умеренная
Атмосферные осадки	+0,60	0,01	Высокая	+0,11	0,03	Слабая
Солнечная радиация	-0,60	4,60	Заметная обратная	+0,11	3,70	Слабая

Исследователи [23] склонны полагать, что зимостойкость растений зависит главным образом от сроков начала и окончания, продолжительности и интенсивности ростовых процессов, а раннее начало и окончание роста побегов, как правило, обеспечивают повышение зимостойкости. Наоборот, растения, поздно начинающие и заканчивающие рост, плохо переносят суровые условия перезимовки [22]. По нашим данным, формирование побегов у *V. opulus* началось на 11 сут. и заканчивалось на 7 сут. раньше, чем у *V. lantana*. Таким образом, местный вид *V. opulus* лучше адаптирован к суровым условиям таежной зоны. Обмерзание побегов у исследуемых видов не наблюдалось.

Развитие растений. Проведенные исследования позволили установить, что ритмика сезонного развития видов имеет свои специфические особенности и отличия (табл. 5). Статистическая обработка материалов показала незначительную и, как правило, не превышающую 3–5 сут. ошибку средней многолетней величины фенодат. Лишь у 4 фенодат она достигает 6–10 сут. При этом точность опыта (погрешность) во всех случаях не превышала 5 %. Вариабельность фенодат у двух видов весьма схожа. Чаще всего среднее квадратическое отклонение составляет от 3 до 5 сут., редко повышаясь до 8–10 сут. Авторы [3] отмечают снижение погодичной вариабельности фенодат с повышением уровня адаптированности интродуцентов к новым климатическим условиям. Изучая развитие различных видов древесных растений в Белоруссии, Н.В. Шкутко [15] обнаружил, что погодичная изменчивость сроков начала тех или иных фенофаз лиственных деревьев может варьировать даже в гораздо больших пределах – от 12 до 27 сут. Результаты цифрового сканирования развития *V. lantana* представлены на рис. 5.

Авторы исследований [3, 7, 8, 21, 24] убедительно показали, что особенности развития различных видов растений обусловлены их неодинаковой требовательностью к экологическим факторам. Поэтому, определив диапазон толерантности растений к экологическим факторам, можно судить о степени адаптации вида к новым условиям местообитания. При анализе состояния среды во время начала фенофаз обнаружена сильная погодичная вариабельность значений относительной влажности воздуха, количества атмосферных осадков и суммарной солнечной радиации (табл. 6). Реакция растений на температурный режим воздуха в момент наступления очередной фенофазы была довольно стабильной и отличалась у исследуемых видов.

Таблица 5

Статистические показатели сезонного развития видов *Viburnum*
Statistical indicators of seasonal development of *Viburnum* species

Фенофаза	Статистические показатели	<i>Viburnum opulus</i>	<i>Viburnum lantana</i>	t_{St}
Набухание почек	$M \pm m_M$	26,04±2,29	15,05±1,1	11,8>4
	σ	9,45	4,3	
Раскрывание почек	$M \pm m_M$	6,05±2,10	21,05±1,7	5,55>4
	σ	8,38	6,6	
Начало роста побегов	$M \pm m_M$	20,05±1,58	30,05±1,6	4,44>4
	σ	6,31	5,7	
Окончание роста побегов	$M \pm m_M$	18,06±5,5	26,06±1,5	3,86>3
	σ	6,60	5,8	
Начало развертывания листьев	$M \pm m_M$	26,05±1,13	27,05±2,4	0,38<1
	σ	4,06	9,1	
Полное облиствление	$M \pm m_M$	21,06±1,14	19,06±2,2	2,48>1,96
	σ	4,40	5,9	
Начало цветения	$M \pm m_M$	28,06±1,20	17,06±1,2	6,47>4
	σ	5,00	3,5	
Конец цветения	$M \pm m_M$	8,07±1,80	25,06±1,5	5,55>4
	σ	7,00	5,5	
Начало образования плодов	$M \pm m_M$	10,06±1,30	26,06±1,1	9,41>4
	σ	5,20	3,00	
Начало созревания плодов	$M \pm m_M$	23,07±2,70	5,09±1,2	14,92>4
	σ	10,00	3,5	
Массовое созревание плодов	$M \pm m_M$	31,07±1,90	15,09±1,6	7,45>4
	σ	5,70	5,4	
Опадание плодов	$M \pm m_M$	19,09±1,90	9,11±2,2	3,80>3
	σ	3,90	6,4	
Начало окрашивания листьев	$M \pm m_M$	10,09±1,20	5,10±1,6	15,00>4
	σ	5,00	5,7	
Полное изменение окраса листьев	$M \pm m_M$	26,09±3,90	15,10±1,2	4,66>4
	σ	7,70	3,5	
Начало опадения листьев	$M \pm m_M$	27,09±2,70	5,11±2,2	14,08>4
	σ	10,00	5,9	
Конец опадения листьев	$M \pm m_M$	5,10±4,40	15,11±1,5	5,94>4
	σ	8,80	5,8	

Примечание: M – средняя фенодата, сут.; m_M – ошибка средней фенодаты, сут.; σ – среднеквадратическое отклонение фенодаты, сут.

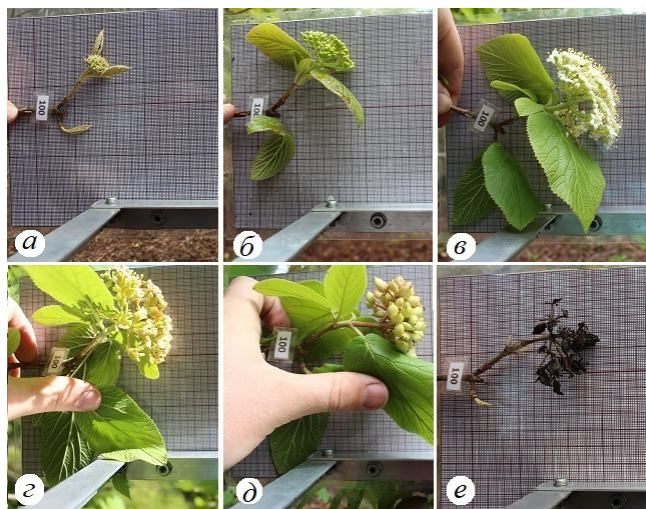


Рис. 5. Сезонное развитие *Viburnum lantana*: а – начало облиствения (25.05.20); б – конец облиствения и бутонизация (05.06.20); в – начало цветения (10.06.20); г – конец цветения (19.06.20); д – процесс созревания плодов (30.07.20); е – конец листопада (01.11.20)

Fig. 5. Seasonal development of *Viburnum lantana*: а – beginning of foliage (25.05.20); б – end of foliage and budding (05.06.20); в – beginning of flowering (10.06.20); г – end of flowering (19.06.20); д – fruit ripening (30.07.20); е – end of leaf fall (01.11.20)

Таблица 6

Среднемноголетние суточные значения экологических факторов во время прохождения фенофаз видами *Viburnum*
Long-term average annual daily values of environmental factors during the phenophases of *Viburnum* species

Фенофаза	Параметр среды	<i>Viburnum opulus</i>	<i>Viburnum lantana</i>
Набухание вегетативных почек	Т	3	5
	В	62	68
	О	0,7	1,4
Раскрытие вегетативных почек	Т	6	7
	В	66	74
	О	1,0	2,0
Начало роста побегов	Т	7	11
	В	63	70
	О	1,2	3,3
Окончание роста побегов	Т	15	14
	В	65	61
	О	0,5	3,0
Начало разворачивания листьев	Т	9	10
	В	60	63
	О	2,5	2,0

Окончание табл. 6

Фенофаза	Параметр среды	<i>Viburnum opulus</i>	<i>Viburnum lantana</i>
Полное облиствление	T	13	15
	B	60	66
	O	1,7	3,4
Начало цветения	T	14	13
	B	72	73
	O	0,8	1,6
Конец цветения	T	22,7	15,3
	B	70,8	74,0
	O	0,6	2,3
Начало образования плодов	T	14,7	16,8
	B	76	81
	O	1,8	4,5
Начало созревания плодов	T	16,5	13
	B	72	75
	O	1,8	2,1
Массовое созревание плодов	T	15	9
	B	75	78
	O	4,3	1,0
Полное изменение окраса листьев	T	13,9	6,5
	B	70	72
	O	1,6	2,0
Конец опадения листьев	T	11	3
	B	74	75
	O	1,2	1,5

Примечание: T – температура воздуха, °C; B – относительная влажность воздуха, %; O – количество атмосферных осадков, мм/сут.

Большинство фенофаз генеративного развития *V. opulus* протекало при более высокой температуре, чем у *V. lantana*. Так, у *V. opulus* цветение начиналось при +14,4 °C и заканчивалось при +22,7 °C, плоды начинали созревать при +16,5 °C, температуры оказались соответственно на 1,9; 2,6 и 2,5 °C выше, чем для тех же фаз *V. lantana*. Лишь начало образования плодов у *V. lantana* наблюдалось при температуре +16,8 °C, что на 2,1 °C выше, чем у *V. opulus*.

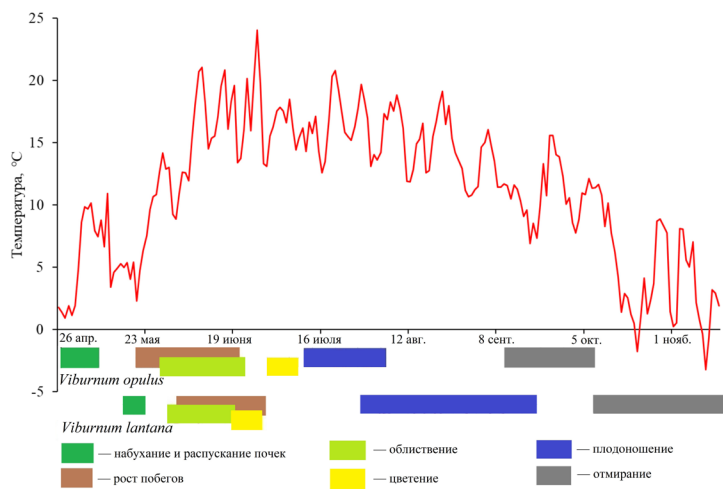
Таким образом, в связи с особенностями развития вегетативной и генеративной сфер изученные виды можно отнести к рано (*V. opulus*) и поздно (*V. lantana*) начинающим и заканчивающим развитие. Вид *V. opulus* менее требователен к температурному режиму воздуха в начале вегетационного периода по сравнению с *V. lantana*, однако заканчивает свое развитие при более теплой погоде, что удлиняет период его подготовки к зимнему покою. Вид, поздно заканчивающий развитие (*V. lantana*), нередко оказывается в крайне неблагоприятных погодных условиях рано наступающей зимы. Однако обмерзание побегов зимой у *V. lantana* отмечено не было. Этот вывод согласуется с мнением ряда исследователей [9, 10, 20].

Для того чтобы судить о направлении, форме и силе связи между экологическими факторами и сроками наступления фенофаз, был проведен корреляционный анализ. Оказалось, что степень корреляции может существенно меняться

в зависимости от биологии вида и специфики конкретной фенофазы. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют об умеренном ускорении наступления всех фенофаз развития побегов у *V. opulus* с повышением температуры воздуха – теснота связи по шкале Чеддока прямая умеренная, $r = +0,4...0,5$. Для *V. lantana* данная зависимость прямая слабая, $r = +0,1...0,3$. При этом критерий t_{St} для большинства фенодат более 4, т. е. выводы обоснованы в 100 % случаев, и только для фазы начала разворачивания листьев критерий менее 1, т. е. различия недостоверны. Зависимость фенологического развития видов рода *Viburnum* от температуры воздуха представлена на рис. 6. Корреляцию динамики относительной влажности воздуха с количеством атмосферных осадков и фенодатами у изученных видов рода *Viburnum* установить не удалось.

Рис. 6. Феноспектр видов рода *Viburnum* и динамика среднесуточной температуры воздуха

Fig. 6. Phenospectrum of *Viburnum* species and dynamics of average daily air temperature



Комплексная оценка перспективности интродуцированного вида *V. lantana* в сопоставлении с аборигенным *V. opulus* позволила установить, что первый относится к высокоперспективным: 94 балла (табл. 7). Аналогичный вывод относительно данного вида, интродуцированного в зоны смешанных и хвойных лесов, сделан и другими исследователями [1, 2, 4, 14, 20].

Таблица 7

Оценка (в баллах) перспективности интродукции *Viburnum lantana*
Evaluation of the prospects (points) for the introduction of *Viburnum lantana*

Степень ежегодного вызревания побегов	Зимостойкость	Сохранение габитуса	Побегообразовательная способность	Регулярность прироста осевых побегов	Способность к генеративному развитию	Возможность размножения в культуре	Итого
15	25	10	5	4	25	10	94

Заключение

На основании проведенного исследования разработаны приемы неразрушающего цифрового сканирования органов древесных растений. Предложенное фотометрическое устройство позволило эффективно и без по-

вреждений фиксировать сезонную динамику растений. Анализ результатов оцифровки выявил закономерности роста и развития местного вида *Viburnum opulus* и интродуцированного в условия Карельского таежного района вида *V. lantana* в зависимости от воздействия метеорологических факторов. В ритмике сезонной динамики изученных видов обнаружены отличия, связанные с влиянием текущего и предшествующего состояния окружающей среды. Наибольшая зависимость наступления начала роста и большинства фенодат наблюдается от температуры воздуха. Установлено, что раннее начало и окончание вегетации свойственны *V. opulus*. Рост и развитие *V. lantana* происходят при более теплой температуре. *V. lantana* следует отнести к высокоперспективным интродуцентам и рекомендовать для введения в культуру ценнозны и озеленения населенных пунктов таежной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абрамчук А.В., Карпукхин М.Ю.* Калина в садово-парковом строительстве // Вестн. биотехнологии. 2019. № 4(21). С. 16.
Abramchuk A.V., Karpukhin M.Yu. Kalina in Landscape Gardening. *Bulletin of biotechnology*, 2019, no. 4(21), p. 16. (In Russ.).
2. *Акимов М.Ю., Макаров В.Н., Жбанова Е.В., Влазнева Л.Н., Масленников А.И.* Плоды калины перспективных сортов как ценный источник пищевых и биологически активных веществ // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2018. № 13. С. 603–607.
Akimov M.Yu., Makarov V.N., Zhbanova E.V., Vlazneva L.N., Maslennikov A.I. *Viburnum* Fruits of Promising Varieties as a Valuable Source of Food and Biologically Active Substances. *New and Unconventional Plants and Prospects for Their Use*. 2018, no. 13, pp. 603–607. (In Russ.).
3. *Булыгин Н.Е., Ярмишко В.Т.* Дендрология. М.: МГУЛ, 2003. 528 с.
Bulygin N.E., Yarmishko V.T. *Dendrology*. Moscow, MGUL Publ., 2003. 528 p. (In Russ.).
4. *Ермаков М.А., Волкова О.Д., Хоциалова Л.И., Загуменикова Т.Н., Потанова А.В.* Изучение признаков форм и сортов растений калины обыкновенной (*Viburnum opulus* L.) в условиях Главного ботанического сада РАН // Hortus Botanicus. 2019. Т. 14. С. 328–337.
Ermakov M.A., Volkova O.D., Khotsialova L.I., Zagumennicova T.N., Potapova A.V. The Study of the Characteristics of the Forms and Varieties of (*Viburnum opulus* L.) Plants at the Main Botanical Garden of RAS. *Hortus Botanicus*, 2019, vol. 14, pp. 328–337. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15393/j4.art.2019.6184>
5. *Зайцев Г.Н.* Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.
Zaytsev G.N. *Mathematical Statistics in Experimental Botany*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 424 p. (In Russ.).
6. *Иванов В.П., Марченко С.И., Зайцева Л.В., Иванов Ю.В.* Методологические аспекты определения биометрических параметров шишек сосны обыкновенной // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 1. С. 42–46.
Ivanov V.P., Marchenko S.I., Zaitseva L.V., Ivanov Yu.V. Methodological Aspects of Scots Pine Cones Biometrics Determination. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 1, pp. 42–46. (In Russ.).
7. *Кищенко И.Т.* Влияние климатических факторов на сезонный рост деревьев лиственных лесобразующих видов в таежной зоне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 1. С. 51–63.

Kishchenko I.T. The Impact of Climatic Factors on the Seasonal Growth of Deciduous Trees of the Forest-Forming Species in the Taiga Zone. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 1, pp. 51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.51>

8. Лапин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М., 1973. С. 7–68.

Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessing the Prospects of Woody Plants Introduction Based on Visual Observations. *Experience of Woody Plant Introduction*. Moscow, 1973, pp. 7–68. (In Russ.).

9. Масленников А.И. Устойчивость сортов калины к действию абиотических факторов // Вестн. Мичурин. ГАУ. 2015. № 3. С. 97–100.

Maslennikov A.I. Resistance of *Viburnum* Varieties to the Action of Abiotic Factors. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*, 2015, no. 3, pp. 97–100. (In Russ.).

10. Масленников А.И. Оценка максимальной морозостойкости сортов и форм рябины и калины // Плодоводство и ягодоводство России. 2016. Т. 46. С. 220–222.

Maslennikov A.I. Estimation of Maximal Frost Resistance of Rowan and Viburnum Varieties and Forms. *Plodovodstvo i jagodovodstvo Rossii = Pomiculture and small fruits culture in Russia*, 2016, vol. 46, pp. 220–222. (In Russ.).

11. Минин А.А., Ананин А.А., Буйволлов Ю.А., Ларин Е.Г., Лебедев П.А., Поликарпова Н.В., Прокошева И.В., Руденко М.И., Сапельникова И.И., Федотова В.Г., Шуйская Е.А., Яковлева М.В., Янцер О.В. Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2020. № 5(4). С. 89–110.

Minin A.A., Ananin A.A., Buyvolov Yu.A., Larin E.G., Lebedev P.A., Polikarpova N.V., Prokosheva I.V., Rudenko M.I., Sapelnikova I.I., Fedotova V.G., Shuyskaya E.A., Yakovleva M.V., Yantser O.V. Recommendations to Unify Phenological Observations in Russia. *Nature Conservation Research*, 2020, vol. 5(4), pp. 89–110. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2020.060>

12. Молчанов А.А., Смирнов В.В. Методика изучения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 95 с.

Molchanov A.A., Smirnov V.V. *Methods of Studying the Growth of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 95 p. (In Russ.).

13. Мухаметова С.В. Метеорологические условия теплого периода на территории Ботанического сада-института ПГТУ // Hortus botanicus. 2022. Т. 17. С. 90–101.

Mukhametova S.V. Meteorological Conditions of Warm Period in the Territory of the Botanical Garden-Institute of VSUT. *Hortus Botanicus*, 2022, vol. 17, pp. 90–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j4.art.2022.8146>

14. Софронов А.П., Фирсова С.В. Интродукция калины обыкновенной в Кировской области // Аграр. наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 6(67). С. 79–82.

Sofronov A.P., Firsova S.V. Introduction of Viburnum in Kirov Region. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*, 2018, no. 6(67), pp. 79–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.67.6.79-82>

15. Шкютко Н.В. Хвойные Белоруссии: Эколого-биологические исследования. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 263 с.

Shkutko N.V. *Conifers of Belarus: Ecological and Biological Studies*. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1991. 263 p. (In Russ.).

16. Augspurger C.K. Spring 2007 Warmth and Frost: Phenology, Damage and Refoliation in a Temperate Deciduous Forest. *Functional Ecology*, 2009, vol. 23, iss. 6, pp. 1031–1039. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01587.x>

17. Cheung P.K., Fung C.K.W., Jim C.Y. Seasonal and Meteorological Effects on the Cooling Magnitude of Trees in Subtropical Climate. *Building and Environment*, 2020, vol. 177, art. 106911. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106911>
18. Gloning P., Estrella N., Menzel A. The Impacts of Climate Change on the Winter Hardiness Zones of Woody Plants in Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, vol. 113, pp. 683–695. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0817-5>
19. Henke M., Huckemann S., Kurth W., Sloboda B. Reconstructing Leaf Growth Based on Non-Destructive Digitizing and Low-Parametric Shape Evolution for Plant Modelling over a Growth Cycle. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 2, art. 1019. <https://doi.org/10.14214/sf.1019>
20. Kollmann J., Grubb P.J. *Viburnum lantana* L. and *Viburnum opulus* L. (*V. lobatum* Lam., *Opulus vulgaris* Borkh.). *Journal of Ecology*, 2002, vol. 90, iss. 6, pp. 1044–1070. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2002.00724.x>
21. Meili N., Manoli G., Burlando P., Carmeliet J., Chow W.T.L., Coutts A.M., Roth M., Velasco E., Vivoni E.R., Fatichi S. Tree Effects on Urban Microclimate: Diurnal, Seasonal, and Climatic Temperature Differences Explained by Separating Radiation, Evapotranspiration, and Roughness Effects. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, vol. 58, art. 126970. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126970>
22. Nilsson O. Winter Dormancy in Trees. *Current Biology*, 2022, vol. 32, iss. 12, pp. R630–R634. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.04.011>
23. Szalay L., György Z., Tóth M. Frost Hardiness of Apple (*Malus X domestica*) Flowers in Different Phenological Phases. *Scientia Horticulturae*, 2019, vol. 253, pp. 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.055>
24. Wang Z., Zhang X., Zhang J., Chhin S. Effects of Stand Factors on Tree Growth of Chinese Fir in the Subtropics of China Depends on Climate Conditions from Predictions of a Deep Learning Algorithm: A Long-Term Spacing Trial. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 520, art. 120363. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120363>

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

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

Научная статья
УДК 634.948.471
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-71-81

Корневая система тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.)

О.Н. Тюкавина[✉], д-р с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Л.Ф. Попова, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [W-4158-2018](https://orcid.org/0000-0003-1650-6797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-6797>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru[✉], lf.popova@narfu.ru

Поступила в редакцию 19.01.21 / Одобрена после рецензирования 23.04.21 / Принята к печати 26.04.21

Аннотация. Цель исследования – изучение особенностей корневой системы тополя бальзамического в условиях г. Архангельска. Актуальность темы определяется многофункциональностью тополя в условиях города. Эффективность saniрующих функций, фиторемидации, депонирования углерода, устойчивость тополей обусловлены состоянием их корневой системы. Выявление особенностей ее строения позволит подбирать и создавать условия, необходимые для успешного произрастания деревьев этого вида. Исследования структуры корневой системы, учет количества, диаметра и разветвленности корней разных порядков проводили по выкорчеванным деревьям, произрастающим одиночно и в группах. В скверах при помощи прибора «Арботом» с модулем «Арборадикс» оценивали протяженность скелетных корней тополя с их последующей поверхностной раскопкой. Устойчивость тополей к ветровалу обеспечивается мощным фундаментом в центральной части корневой системы, формирующимся из разросшейся сердцевины, досковидных оснований проксимальных корней и обрастающих корней. Изгибание корней первых порядков на раннем этапе развития дерева создает удерживающую платформу для черенка. Сближенное групповое произрастание тополей приводит к «этажированию» и углублению корневой системы. При групповом произрастании тополей формируется большее количество проксимальных корней, но с меньшим диаметром по сравнению с корнями солитеров. Так, средний диаметр основания корней первого порядка при групповом произрастании составляет 11,5 см, при одиночном – 24,5 см. Протяженность скелетных корней тополей в скверах – от 2 до 9 м. Сокращение доли тополей в насаждении в 2,3 раза в сочетании со снижением густоты древостоя в 2 раза или площади дорожек в 2 раза приводит к увеличению протяженности скелетных корней в 1,5–2 раза, формированию более равномерной корневой системы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании зеленых насаждений в городе.

Ключевые слова: тополь бальзамический, устойчивость тополя, городские насаждения, корневая система, структура корневой системы, скелетные корни, проксимальные корни, обрастающие корни, «Арборадикс», Архангельск

Для цитирования: Тюкавина О.Н., Попова Л.Ф. Корневая система тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 71–81. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-71-81>

Original article

Root System of Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.)

Olga N. Tyukavina[✉], Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Ludmila F. Popova, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [W-4158-2018](https://orcid.org/0000-0003-1650-6797),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-6797>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.tukavina@narfu.ru[✉], lf.popova@narfu.ru

Received on January 19, 2021 / Approved after reviewing on April 23, 2021 / Accepted on April 26, 2021

Abstract. The research aims at studying the features of the balsam poplar root system in the conditions of Arkhangelsk. The relevance of the topic is determined by the poplar multifunctionality in urban conditions. The effectiveness of sanitation functions, phytoremediation, carbon sequestration, and sustainability of poplars is determined by their root system condition. Understanding the specifics of its structure will enable the selection and creation of conditions necessary for the successful growth of trees of this species. Studies of the root system structure, recording the number, diameter, and branching of roots of different orders were carried out on uprooted trees growing isolated as well as in groups. In public gardens, the length of poplar skeletal roots with their subsequent surface excavation was assessed using the Arbotom device with the Arboradix module. A strong foundation in the central part of the root system, formed of the overgrown core, buttress roots of the first order and fibrous roots, provides resistance of poplars to windthrow. The bending of first-order roots early in tree development creates a holding platform for the branch cuttings. The close group growth of poplars leads to “storeying” and deepening of the root system. Poplars growing in groups form a greater number of proximal roots with a smaller diameter compared to isolated growth. Thus, the average diameter of the base of the first-order roots in group growth is 11.5 cm; in single growth – 24.5 cm. The length of poplar skeletal roots in public gardens ranges from 2 to 9 m. Reducing the share of poplars in the plantation by 2.3 times together with a decrease in stand density by 2 times or track area by 2 times leads to an increase in the length of skeletal roots by 1.5–2 times and the formation of a more uniform root system. The results can be used in the design of urban green spaces.

Keywords: balsam poplar, poplar stability, urban plantations, root system, root system structure, skeletal roots, proximal roots, fibrous roots, Arboradix, Arkhangelsk

For citation: Tyukavina O.N., Popova L.F. Root System of Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 71–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-71-81>

Введение

Тополь – перспективная древесная порода. Для озеленения в условиях Севера России наиболее предпочтителен тополь бальзамический [5], так как он характеризуется наивысшими по сравнению с другими древесными видами адаптивной способностью (комплексная оценка по акклиматизационному



числу [1]), газоустойчивостью, морозоустойчивостью, холодостойкостью, относительной устойчивостью к болезням и токсикантам [2]. Изучение роста и продуктивности тополей в основном было связано с получением древесины для производства целлюлозы, биотоплива [25, 27]. Однако тополя используются и в создании защитных, буферных зон [16, 23, 24, 26, 29, 32]. Проблемы потепления климата и повышенного содержания парниковых газов в атмосфере стимулируют исследование тополей как потенциальных поглотителей углерода из-за быстрого накопления этими деревьями биомассы над и под землей [9, 14, 18]. Несмотря на сохранение интереса исследователей к корневым системам тополей [7, 8, 10, 15, 20], их морфология и биология недостаточно изучены, особенно в посадках черенками. Учет особенностей строения корневой системы тополей при ландшафтном строительстве, озеленении городов и создании плантаций обеспечит эффективное выполнение тополями saniрующих функций, депонирование углерода и устойчивость к ветровым нагрузкам.

Цель исследования – изучение особенностей корневой системы тополей бальзамических в условиях г. Архангельска.

Объекты и методы исследования

Исследование структуры корневой системы тополя бальзамического проводили по 10 деревьям, выкорчеванным вдоль Троицкого и Ленинградского проспектов: 5 деревьев произрастали в групповых посадках, 5 – одиночно. Диаметр деревьев – от 57 до 62 см; возраст – от 50 до 60 лет; расстояние между деревьями (измеряли от центра дерева) в групповых посадках – менее 1 м. У корневой системы в 10-кратной повторности фиксировали диаметры корней разных порядков у основания и на расстоянии от него. Определяли количество ответвлений на корнях разных порядков и диаметров. Рассчитывали интенсивность разветвленности корней как количество ответвлений на единицу протяженности корня. Производили раскопку оставшихся в почве корней в радиусе до 4 м. Определяли глубину залегания корней.

Протяженность корней тополя оценивали у 15 растущих деревьев на следующих объектах. Сквер у Молодежного театра: занимает 1355 м²; дорожки составляют 11 % от его площади; густота насаждения – 857 шт./га; средняя высота, диаметр и возраст тополей – 25,9 м, 42,1 см и 45 лет соответственно; почва – культурозем; полевая влажность – 40 %. Сквер у Драмтеатра: 15 762 м²; дорожки – 10 %; густота насаждения – 277 шт./га; средняя высота, диаметр и возраст тополей – 30,2 м, 55,6 см и 40 лет соответственно; почва – культурозем; полевая влажность – 38 %. Сквер у Лесозавода № 3: 3916 м²; дорожки – 5 %; густота насаждения – 390 шт./га; средняя высота, диаметр и возраст тополей – 30,1 м, 45,9 см и 42 года соответственно; почва – дерновая; полевая влажность – 45 %.

Полевую влажность определяли весовым методом на глубине 10 см. Для оценки протяженности корневой системы использовали прибор «Арботом» с модулем «Арборадикс». Сенсоры «Арботома» закрепляли на стволе на высоте 1,3 м с расстоянием по окружности 10 см. Модуль «Арборадикс» представляет собой стальную штангу с сенсором, присоединенным кабелем к другому сенсору, установленному на стволе дерева. С помощью резинового молотка и стальной штанги механические импульсы последовательно через каждый метр от соответствующих сенсоров «Арботома» направлялись в почву в 4 стороны (север, юг, запад, восток).

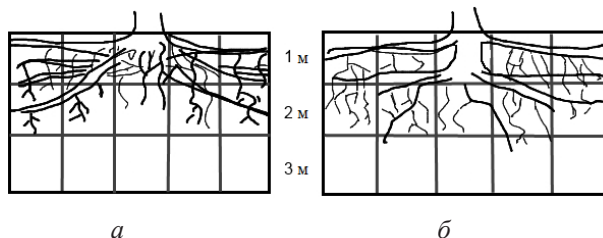
Исходили из гипотезы, что если звуковой импульс не доходит до сенсора на дереве, то в почве под штангой его корни отсутствуют. Наименьший диаметр корня, при котором он способен улавливать звуковой импульс, посылаемый штангой «Арборадикса», находится в диапазоне от 1,4 до 2,1 см. В сходных почвенных условиях (культуроземы) вблизи театров различие в данных о диаметрах корней незначимо. Следовательно, «Арборадикс» в комплексе с «Арботомом» позволяет выявить распространение скелетных корней диаметром от 1,4 см.

Последняя точка измерения по конкретному направлению определялась наличием звукового сигнала. Точки, с которых направляли импульсы в почву, записывались и графически изображались в линейной диаграмме программы Arboradix™ в виде луча, соответствующего протяженности корня, с возможностью определения его длины. Если корень изначально не обнаруживался, проводили исследование по дополнительному румбу. После оценки протяженности корней обозначали в натуре периметр корней и направления исследования. В завершающей точке изучения конкретного направления раскапывали корень, при его отсутствии смещали раскопку в сторону – образовывалась траншея. При обнаружении корня определяли средний диаметр в вертикальном и горизонтальном направлениях и проводили поверхностную раскопку для проверки принадлежности корня к данному дереву. Для каждого дерева рассчитывали среднюю протяженность корней по 4 направлениям, находили максимальную разницу в протяженности корней. Исследования осуществляли в июле в сухую погоду.

При обработке данных использовали программу Statistica 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Посадки тополя в г. Архангельске осуществлялись черенками. Подземная часть черенка исполняет роль главного корня, от которого отходят горизонтальные корни. Таким образом, корневая система представлена придаточными корнями. Корни образуются по всей длине подземной оси дерева (см. рисунок). Подземная ось заканчивается площадкой. При повреждении ствола тополя каллус образуется быстро и в большом количестве [4], придаточные корни формируются недалеко от поверхности среза над каллусом. Так называемые раневые случайные корни начинаются от каллуса на нижней поверхности среза, но они недолговечны [28].



Корневая система тополя: *a* – солитер; *b* – дерево в групповой посадке (размер ячейки сетки – 1×1 м)

Poplar root system: *a* – single tree; *b* – tree in a group planting (grid cell size 1×1 m)

От подземной оси дерева отходят 4–6 корней первого порядка, называемых проксимальными [15], с ясно выраженными толстыми (до 8–19 см в ширину и 13–35 см в высоту) дисковидными основаниями. Такие корни придают дереву большую устойчивость [3]. Причем их наивысшая прочность отмечается в нижней части корневой системы [34]. Эти корни занимают поверхностные слои почвы в радиусе 3–4 м вокруг дерева. При одиночном произрастании у тополя формируется мощный фундамент, утолщенная часть подземного ствола с основаниями придаточных корней первого порядка дисковидной формы. Диаметр такой сердцевины корневой системы в 2 раза больше диаметра ствола. Формирование сердцевины корневой системы происходит за счет обрастания с увеличением возраста дерева первичных косо-вертикальных корней древесной массой, что приводит к образованию мощного фундамента. Сердцевина корневой системы и корни первого порядка формируют «якорь», удерживающий дерево в почве.

У ряда корней первого и второго порядков при уменьшении их диаметра происходит изгибание. Прочностные характеристики корня наивысшие в точках максимального изгибания корня [34]. Изгибание корней первых порядков обусловлено формированием удерживающей платформы для черенка.

На расстоянии 3–4 м от ствола скелетные корни приобретают форму цилиндров с диаметром от 3 до 5 см. Все корни обильно ветвятся. Корни второго и последующих порядков могут быть горизонтальными и косо-вертикальными. На крупных скелетных корнях развиваются обрастающие корни, которые формируются как в горизонтальных, так и в вертикальных направлениях по всей протяженности скелетных корней первого и второго порядков. Обрастающие корни в основании представлены разным диаметром – от 1 до 5 мм и более, следовательно, они возникают на одном и том же участке корня в разные возрастные периоды.

Обрастающие корни могут быть 2 видов: в форме цилиндров и в форме конусов. Конусообразные корни (якорные) отходят от нижней поверхности придаточных корней первого порядка и имеют многочисленные ответвления. Они направлены вниз и достигают глубины 50–60 см. Такие корни закрепляют придаточные корни первого порядка и способствуют большей устойчивости дерева [3]. А. Stokes, С. Mattheck [34] указывают, что интенсивное ветвление сердцевины и дисковидных корней первого порядка позволяет повысить устойчивость дерева независимо от длины скелетных корней. Деревья постоянно модифицируют свою корневую систему в попытке адаптироваться и лучше использовать среду укоренения [11].

При длительном подтоплении корневой системы тополя в период активного роста отмечается гибель якорных обрастающих корней, что приводит к вывалу деревьев при штормовых порывах ветра. Например, в Маймаксанском округе с восточной стороны дороги по улице Победы на некоторых участках в мае–начале июня отмечаются подпор грунтовых вод в связи с нарушением естественного стока и, как результат, вывал деревьев тополя в сторону от дороги. Интересен тот факт, что корневая система дерева доходит до оптимальных условий и дерево, несмотря на вертикальное положение корневой лапы, продолжает вегетировать.

При групповом произрастании для тополей характерно «этажирование» корневой системы. Согласно Г.И. Редько [6], этажирование – результат приспособления корневой системы к почвенным условиям. Выделяется 2 центра ветвления подземного ствола: верхний «этаж» скелетных корней располагается

в поверхностном слое почвы на глубине до 35–40 см, нижний – на глубине 70–105 см. В первом ярусе корневой системы отмечается практически в 1,5 раза меньше корней первого порядка по сравнению со вторым ярусом, что приводит к формированию большей массы корней второго этажа (табл. 1). Получается, основная масса тонких корней располагается глубже 1 м, в то время как при одиночном произрастании – до 1 м.

Таблица 1

Характеристики корневой системы тополя бальзамического при различных условиях произрастания
Characteristics of the balsam poplar root system in various growing conditions

Показатель	Условия произрастания		
	Одиночное	Групповое	
	1	1	2
Количество корней первого порядка, шт.	6	4	6
Интенсивность разветвленности корней, шт./м:			
первого порядка	4±0,3	2±0,7	3±0,6
второго порядка	8±0,4	7±0,8	8±0,5
третьего порядка	15±0,6	14±0,8	16±0,7
Интенсивность разветвленности корней, шт./см:			
диаметром 5 мм	1,1±0,2	1,0±0,3	2,0±0,5
диаметром 1 мм	1,1±0,3	1,0±0,4	1,3±0,3
диаметром 0,1 мм	15,0±3,0	12,0±4,0	10,0±3,0
Диаметр основания корней, см*:			
первого порядка	31,5±1,6	14,5±0,7	13,8±0,5
	17,5±0,7	9,0±0,4	9,0±0,6
второго порядка	12,6±0,4	12,3±0,4	12,1±0,2
	10,5±0,3	9,5±0,3	10,0±0,4
третьего порядка	2,9±0,2	2,5±0,3	2,7±0,2
	2,9±0,4	2,5±0,4	2,7±0,3
Диаметр корней первого порядка на расстоянии 3 м от дерева, см:			
по высоте	6,0±0,4	4,0±0,2	4,3±0,2
по ширине	5,0±0,5	3,0±0,4	3,1±0,3

*В верхней строке представлены значения по высоте, в нижней – по ширине.

При близком расположении деревьев друг от друга (расстояние между центрами – около 50–60 см) в направлении соседнего дерева корень первого порядка не развивается в верхнем этаже корневой системы, что приводит к неравномерному распределению проксимальных корней вокруг ствола. Это подтверждает чувствительность тополя к внутри- и межвидовой конкуренции корней [12, 30, 31]. Такая стратегия распределения корней называется «избегание конкуренции» [31]. В результате корневой конкуренции происходит углубление корневой системы. На уменьшение количества корней и более глубокое их распределение в почвенном профиле при наличии барьеров также указывали L.R. Costello, C.L. Elmore, S. Steinmaus [13].

Вертикальный диаметр основания корней первого порядка при близком произрастании 2 деревьев тополя в первом и втором ярусе корневой системы составляет в среднем 15 см, что в 2 раза меньше по сравнению с диаметрами одиночно произрастающих деревьев. Соглас-

но М. Lухová [28], радиальный рост придаточных корней ограничен и есть значительные различия в радиальных приростах отдельных корней. Меньшая толщина корней в верхнем ярусе корневой системы обусловлена корневой конкуренцией между соседними деревьями. Согласно Р. Hajek, D. Hertel, С. Leuschner [22], у тополя в результате внутри- и межвидовой конкуренции формируются более тонкие и длинные корни первого и второго порядков, но влияние этого фактора на морфологию мелких корней незначительно. В нашем примере диаметры корней третьего порядка при групповом и одиночном произрастании также значимо не различались. Более тонкие корни первого порядка во втором ярусе корневой системы при групповом произрастании тополя образуются в результате менее благоприятных свойств почвы на данной глубине. Так, в городских ландшафтах наиболее хорошие условия по обеспеченности воздухом и минеральными ресурсами складываются вблизи поверхности почвы [13], что обуславливает размещение здесь корневых систем древесных растений [17, 19, 21]. Меньшее количество доступной влаги, питательных веществ и кислорода приводит к снижению роста корневой системы тополя [33].

Диаметр основания проксимальных корней положительно связан с общей биомассой и длиной корня [15]. В результате меньшее количество проксимальных корней при одиночном произрастании уравнивается их большим диаметром по сравнению с групповым, что обеспечивает равенство общей биомассы корней в обоих случаях.

Скелетные корни, удаленные от сердцевины корневой системы, более прочные по сравнению с досковидными корнями в основании [34]. Поэтому наибольшая протяженность скелетных корней первых порядков обеспечит и наибольшую устойчивость дерева к воздействию ветра.

Согласно показаниям прибора «Арботом» с модулем «Арборадикс», протяженность корней растущих тополей в сквере у Драмтеатра составила от 2 до 6 м, в сквере у Молодежного театра – от 1 до 5 м, в сквере вблизи Лесозавода № 3 – от 4 до 9 м. В среднем протяженность корней в сквере вблизи Лесозавода № 3 превышает данный показатель в скверах вблизи театров в 2 раза (табл. 2), что обусловлено меньшими площадью дорожек, густотой насаждения и процентным соотношением древесных пород в нем. В скверах вблизи театров доминируют тополя (76 и 81 % соответственно), а в удаленном от центра города сквере – береза. Тополя здесь составляют 34 %. Большой процент дорожек приводит к уплотнению почвы, а однородные в видовом составе насаждения – к внутривидовой конкуренции, что ограничивает распространение корней в поверхностных слоях почвы. Протяженность скелетных корней тополей в скверах театра Драмы и Молодежного театра значимо не различается, несмотря на различие в густоте насаждения в 3 раза. Меньшая густота первого насаждения компенсируется большей плотностью дорожек по сравнению со вторым. В результате сокращения доли тополей в насаждении в 2,3 раза в сочетании со снижением густоты древостоя в 2 раза или площади дорожек в 2 раза протяженность скелетных корней увеличилась в 1,5–2 раза.

Влияние на протяженность корней может оказывать и почва, которая в сквере у Лесозавода № 3 более бедная по сравнению с культуросемами центральных скверов, дополнительно периодически отсыпаемых привозной почвой с полей и огородов. Однако данный фактор в основном воздействует на локацию концентрации тонких корней относительно ствола и определяет зону питания дерева, в то время как скелетные корни выполняют функцию его фундамента.

Таблица 2

**Характеристики корневой системы тополя бальзамического
на объектах исследования**

Characteristics of the balsam poplar root system

Показатели статистического анализа	Средняя протяженность корней дерева, м	Наибольшее различие в протяженности корней дерева, м	Минимальный диаметр корня, способный улавливать звуковой импульс, см
<i>Сквер у Драмтеатра</i>			
$M \pm m_M$	3,7±0,3	1,9±0,4	1,8±0,1
δ	1,37	1,51	0,40
C	37,0	79,4	22,2
t_1	10,6	4,8	18,0
p	9,5	20,5	5,6
<i>Сквер у Молодежного театра</i>			
$M \pm m_M$	3,2±0,2	1,8±0,2	1,9±0,1
δ	1,01	0,90	0,30
C	31,5	50,0	15,8
t_1	16,0	9,0	23,7
p	6,3	11,1	4,2
<i>Сквер у Лесозавода № 3</i>			
$M \pm m_M$	6,7±0,5	1,3±0,2	1,6±0,1
δ	1,86	0,82	0,23
C	27,8	63,0	14,3
t_1	13,4	6,5	32,0
p	7,4	15,3	3,1

Примечание: M – среднее значение; m_M – основная ошибка среднего значения; δ – среднее квадратичное отклонение; C – коэффициент изменчивости; t_1 – достоверность среднего значения; p – точность опыта.

Различие протяженности скелетных корней у конкретного дерева в сквере Драмтеатра составляло 4 м у 13 % деревьев, 3 м – у 33 %; в сквере Молодежного театра – 3 м у 23 % деревьев. В сквере вблизи Лесозавода № 3 максимальное различие протяженности корней дерева – 2 м. Следовательно, при меньших густоте насаждения, плотности дорожек и при смешанном составе деревьев в насаждении у тополя формируется более равномерная, уравновешенная по длине корневая система.

Заключение

Результаты исследований показали, что корневая система тополя бальзамического, выращенного из черенков, представляет собой систему придаточных корней. Устойчивость к ветровалу достигается за счет сформированной подземной осью дерева мощной сердцевины корневой системы, досковидных оснований корней первого порядка и развития на них обрастающих корней. При сближенном групповом произрастании тополей формируется 2-ярусная корневая система с большим количеством проксимальных корней, что обеспечивает значительную поглощающую поверхность, но меньший их

диаметр по сравнению с корнями солитеров и, следовательно, меньшую ветроустойчивость. При близком произрастании тополей сокращается количество скелетных корней первого порядка с выпадением их в направлении соседнего дерева. Ветроустойчивость тополя обуславливается также протяженностью скелетных корней. Протяженность скелетных корней с диаметром более 1,4 см составляет от 2 до 9 м. При небольших густоте насаждения, плотности дорожек в сквере и смешанном составе насаждения формируются скелетные корни первого порядка, равномерно распределенные вокруг ствола и имеющие большую протяженность.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании экологического каркаса города, в котором «ячейки природы» следует формировать из тополя бальзамического с примесью других древесных видов, избегая их близкого расположения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Залывская О.С. Комплексная оценка адаптивной способности интродуцентов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 161–166. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ea7/2-_-kompleksnaya-otsenka-adaptivnoy-sposobnosti-introdutsentov.pdf
2. Zalyvskaya O.S. Comprehensive Evaluation of Adaptive Capacity of Introduced Species. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 6, pp. 161–165. (In Russ.).
3. Исаева Е.В. Комплексная переработка вегетативной части тополя бальзамического с получением биологически активных продуктов: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2008. 381 с.
4. Isaeva E.V. *Complex Processing of the Balsam Poplar Vegetative Part of with Obtaining Biologically Active Products*: Dr. Eng. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2008. 381 p. (In Russ.).
5. Коцеев А.Л. Заболачивание и разболачивание вырубков // Тр. Ин-та леса АН СССР. М., 1954. С. 134–140.
6. Koshcheev A.L. Waterlogging and Reclamation of Clearcuts. *Proceedings of the Forest Institute of the USSR Academy of Sciences*. Moscow, 1954, pp. 134–140. (In Russ.).
7. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 462 с.
8. Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 462 p. (In Russ.).
9. Орлов Ф.Б. Озеленение городов и поселков Архангельской области. Архангельск: Арханг. обл. гос. изд-во, 1951. 26 с.
10. Orlov F.B. *Greening of Cities and Towns of the Arkhangelsk Region*. Arkhangelsk, Arkhangel'skoye oblastnoye gosudarstvennoye izdatel'stvo, 1951. 26 p. (In Russ.).
11. Редько Г.И. Биология и культура тополей. Л.: ЛГУ, 1975. 174 с.
12. Red'ko G.I. *Biology and Trial of Poplars*. Leningrad, LGU Publ., 1975. 174 p. (In Russ.).
13. Adonsou K.E., DesRochers A., Tremblay F., Thomas B.R., Isabel N. The Clonal Root System of Balsam Poplar in Upland Sites of Quebec and Alberta. *Ecology and Evolution*, 2016, vol. 6, iss. 19, pp. 6846–6854. <https://doi.org/10.1002/ece3.2441>
14. Bilodeau-Gauthier S., Paré D., Messier C., Bélanger N. Root Production of Hybrid Poplars and Nitrogen Mineralization Improve Following Mounding of Boreal Podzols. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 43, no. 12, pp. 1092–1103. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0338>
15. Block R.M.A. *Fine Root Dynamics and Carbon Sequestration in Juvenile Hybrid Poplar Plantations in Saskatchewan, Canada*. M.Sc. Thesis. Saskatoon, University of Saskatchewan, 2004.

10. Chen Z.-X., Ni H.-G., Jing X., Chang W.-J., Sun J.-L., Zeng H. Plant Uptake, Translocation, and Return of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons via Fine Root Branch Orders in a Subtropical Forest Ecosystem. *Chemosphere*, 2015, vol. 131, pp. 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.045>
11. Chiatante D., Beltotto M., Onelli E., Di Iorio A., Montagnoli A., Scippa S.G. New Branch Roots Produced by Vascular Cambium Derivatives in Woody Parental Roots of *Populus nigra* L. *Plant Biosystems*, 2010, vol. 144, iss. 2, pp. 420–433. <https://doi.org/10.1080/11263501003718612>
12. Coll L., Messier C., Delagrange S., Berninger F. Growth, Allocation and Leaf Gas Exchanges of Hybrid Poplar Plants in Their Establishment Phase on Previously Forested Sites: Effect of Different Vegetation Management Techniques. *Annals of Forest Science*, 2007, vol. 64, pp. 275–285. <https://doi.org/10.1051/forest:2007005>
13. Costello L.R., Elmore C.L., Stelnmaus S. Tree Root Response to Circling Root Barriers. *Journal of Arboriculture*, 1997, vol. 23(6), pp. 211–218. <https://doi.org/10.48044/jauf.1997.033>
14. Dewar R.C., Cannell M.G.R. Carbon Sequestration in the Trees, Products and Soils of Forest Plantations: An Analysis Using UK Examples. *Tree Physiology*, 1992, vol. 11, iss. 1, pp. 49–71. <https://doi.org/10.1093/treephys/11.1.49>
15. Domenicano S., Coll L., Messier C., Berninger F. Nitrogen Forms Affect Root Structure and Water Uptake in the Hybrid Poplar. *New Forests*, 2011, vol. 42, pp. 347–362. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9256-x>
16. Douglas G.B., McIvor I.R., Potter J.F., Foote L.G. Root Distribution of Poplar at Varying Densities on Pastoral Hill Country. *Plant and Soil*, 2010, vol. 333, pp. 147–161. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0331-4>
17. Eavis B.W., Payne D. Soil Physical Conditions and Root Growth. *Root Growth*. Ed. by W.J. Whittington. London, Butterworths, 1968, pp. 256–269.
18. Eissenstat D.M., Wells C.E., Yanai R.D., Whitbeck J.L. Building Roots in a Changing Environment: Implications for Root Longevity. *New Phytologist*, 2000, vol. 147, iss. 1, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00686.x>
19. Fernandez T.R., Perry R.L., Ferree D.C. Root Distribution Patterns of Nine Apple Rootstocks in Two Contrasting Soil Types. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1995, vol. 120, iss. 1, pp. 6–13. <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.1.6>
20. Gaspard D.T., DesRochers A. Natural Root Grafting in Hybrid Poplar Clones. *Trees*, 2020, vol. 34, iss. 4, pp. 881–890. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01966-z>
21. Graecen E.L., Barley K.P., Farrell D.A. The Mechanics of Root Growth in Soil with Particular Reference to the Implications for Root Distribution. *Root Growth*. London, Butterworths, 1969, pp. 256–268.
22. Hajek P., Hertel D., Leuschner C. Root Order- and Root Age-Dependent Response of Two Poplar Species to Belowground Competition. *Plant and Soil*, 2014, vol. 377, iss. 1-2, pp. 337–355. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-2007-3>
23. Husak A.L., Grado S.C. Monetary Benefits in a Southern Silvopastoral System. *Southern Journal of Applied Forestry*, 2002, vol. 26, iss. 3, pp. 159–164. <https://doi.org/10.1093/sjaf/26.3.159>
24. Jordahl J.L., Foster L., Schnoor J.L., Alvarez P.J.J. Effect of Hybrid Poplar Trees on Microbial Populations Important to Hazardous Waste Bioremediation. *Environmental Toxicology* 1997, vol. 16, iss. 6, pp. 1318–1321. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160630>
25. Klasnja B., Kopitovic S., Orlovic S. Wood and Bark of Some Poplar and Willow Clones as Fuelwood. *Biomass and Bioenergy*, 2002, vol. 23, iss. 6, pp. 427–432. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00069-7)
26. Lewis A.C., Baird D.R., Burton S.J. Phytoremediation Technology at the DOE Portsmouth Gaseous Diffusion Plant. *Proceedings – 10th International Conference on*

Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM'05. Glasgow, Scotland, 2005, vol. 2005, pp. 433–438.

27. Li H., Hu J.-J. Seasonal and Annual Dynamics of the Gross Caloric Value of Eleven Poplar and Willow Clones. *Forest Research*, 2010, vol. 23, iss. 3, pp. 425–429. (In Chinese).

28. Luxová M. The Integration of Growth Activity in Vegetatively Propagated Poplar during the Establishment Year. *Biologia Plantarum*, 1984, vol. 26, iss. 6, pp. 433–440. <https://doi.org/10.1007/BF02909593>

29. Ma X., Richter A.R., Albers S., Burken J.G. Phytoremediation of MTBE with Hybrid Poplar Trees. *International Journal of Phytoremediation*, 2004, vol. 6, iss. 2, pp. 157–167. <https://doi.org/10.1080/16226510490454821>

30. Messier C., Coll L., Poitras-Larivière A., Bélanger N., Brisson J. Resource and Non-Resource Root Competition Effects of Grasses on Early- versus Late-Successional Trees. *Journal of Ecology*, 2009, vol. 97, iss. 3, pp. 548–554. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01500.x>

31. Novoplansky A. Picking Battles Wisely: Plant Behaviour under Competition. *Plant, Cell & Environment*, 2009, vol. 32, iss. 6, pp. 726–741. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01979.x>

32. Schnoor J.L., Licht L.A., McCutcheon S.C., Wolfe N.L., Carreira L.H. Phytoremediation of Organic and Nutrient Contaminants. *Environmental Science and Technology*, 1995, vol. 29, no. 7, pp. 318A–323A. <https://doi.org/10.1021/es00007a747>

33. Stefanou S., Papazafeiriou A.Z. The Effect of Soil Physical Properties of an Entisol on the Growth of Young Poplar Trees (*Populus* sp.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 807–812.

34. Stokes A., Mattheck C. Variation of Wood Strength in Tree Roots. *Journal of Experimental Botany*, 1996, vol. 47, iss. 5, pp. 693–699. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.5.693>

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

Научная статья

УДК 634.7

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-82-93

Применение освещения различного спектрального диапазона при клональном микроразмножении лесных ягодных растений

С.С. Макаров^{1,2} , *д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр.*; *ResearcherID*: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

*М.Т. Упадышев*³, *д-р с.-х. наук, чл.-кор. РАН, гл. науч. сотр.*;

ResearcherID: [AAE-1086-2022](https://orcid.org/0000-0003-1069-3771), *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-1069-3771>

*И.Б. Кузнецова*⁴, *канд. с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID*: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>


*А.В. Заушинцева*⁵, *д-р биол. наук, проф.*; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4645-828X>

*Е.И. Куликова*⁶, *канд. с.-х. наук, зав. каф.*; *ResearcherID*: [AAL-8290-2021](https://orcid.org/0000-0002-5981-2690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5981-2690>

*Е.А. Сурина*⁷, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID*: [AAD-6192-2019](https://orcid.org/0000-0002-8159-8977),

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

¹Центрально-европейская лесная опытная станция, просп. Мира, д. 134, г. Кострома, Россия, 156013; makarov_serg44@mail.ru 

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; makarov_serg44@mail.ru

³Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, ул. Загорьевская, д. 4, Москва, Россия, 115598; vstisp@vstisp.org

⁴Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Учебный городок, Караваяевская с/а, д. 34, п. Караваяево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; sonnereiser@yandex.ru

⁵Кемеровский государственный университет, ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, Россия, 650000; alexaz58@yandex.ru

⁶Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Вологодская обл., Россия, 160555; elena-kulikova@list.ru

⁷Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; surina_ea@sevniilh-arh.ru

Поступила в редакцию 26.12.20 / Одобрена после рецензирования 23.03.21 / Принята к печати 25.03.21

Аннотация. В связи с сокращением естественных ресурсов обладающих высокой пищевой и лекарственной ценностью лесных ягодных растений, возрастающим спросом на ягодную продукцию и необходимостью биологической рекультивации выработанных торфяных месторождений целесообразно создание плантаций наиболее востребованных видов этих растений. Приведены результаты исследований клонального микроразмножения лесных ягодных растений – клюквы болотной, клюквы крупноплодной, голубики полуввысокой, княженики арктической, брусники обыкновенной, красники – перспективных сортов и форм с применением освещения различного типа: светодиодных ламп белого спектра, с комбинацией белого, красного и синего спектров,

© Макаров С.С., Упадышев М.Т., Кузнецова И.Б., Заушинцева А.В., Куликова Е.И., Сурина Е.А., 2022



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

люминесцентных ламп белого света. При культивировании растений использовали питательные среды WPM, MS с добавлением цитокининов 2-иР и 6-БАП в различных концентрациях. На этапе собственно микроразмножения при выращивании растений клюквы болотной (сорт Дар Костромы, гибридная форма 1-15-635), клюквы крупноплодной (сорт Ven Lear, гибридная форма 1-23-3), княженики арктической (сорт Анна, гибридная форма К-1), брусники обыкновенной (сортов Костромская розовая и Рубин) и красники (формы Сахалинская и Курильская) наибольшее число (3,3...16,9 шт.) и максимальная суммарная длина (13,8...251,1 см) микропобегов растений наблюдались при освещении светодиодными лампами с комбинацией белого, красного и синего спектров. Формирование наибольшего числа микропобегов (13,1 шт.) с максимальной длиной (98,7 см) у растений голубики полувысокой (сорт Northblue, гибридная форма 23-1-11) отмечено при освещении люминесцентными лампами белого света. Существенных различий биометрических показателей растений при освещении различного типа в зависимости от сортов и форм не обнаружено. Применение светодиодных ламп с комбинацией белого, красного и синего спектров оказывает значительное влияние на формирование микропобегов лесных ягодных растений при клональном микроразмножении.

Ключевые слова: клональное микроразмножение, *in vitro*, освещение, влияние освещения на растения, светодиодные лампы, ягодные растения, клюква, голубика, княженика, брусника, красника

Для цитирования: Макаров С.С., Упадышев М.Т., Кузнецова И.Б., Заушинцева А.В., Куликова Е.И., Сурина Е.А. Применение освещения различного спектрального диапазона при клональном микроразмножении лесных ягодных растений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 82–93. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-82-93>

Original article

The Use of Lighting of Various Spectral Ranges for Clonal Micropropagation of Forest Berry Plants

Sergey S. Makarov^{1,2✉}, *Doctor of Agriculture, Senior Research Scientist;*

ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Mikhail T. Upadyshev³, *Doctor of Agriculture, Corresp. Member of RAS, Chief Research*

Scientist; ResearcherID: [AAE-1086-2022](https://orcid.org/0000-0003-1069-3771), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1069-3771>

Irina B. Kuznetsova⁴, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

Aleksandra V. Zaushintsena⁵, *Doctor of Biology, Prof.;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4645-828X>

Elena I. Kulikova⁶, *Candidate of Agriculture, Head of Department;*

ResearcherID: [AAL-8290-2021](https://orcid.org/0000-0002-5981-2690), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5981-2690>

Elena A. Surina⁷, *Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAD-6192-2019](https://orcid.org/0000-0002-8159-8977),*

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

¹Central European Forest Experimental Station, prosp. Mira, 134, Kostroma, 156013, Russian Federation; makarov_serg44@mail.ru✉

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; makarov_serg44@mail.ru

³Federal Horticultural Research Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, ul. Zagor'yevskaya, 4, Moscow, 115598, Russian Federation; vstisp@vstisp.org



⁴Kostroma State Agricultural Academy, Uchebnyy gorodok, Karavaevskaya s/a, 34, p. Karavaevo, Kostroma District, Kostroma Region, 156530, Russian Federation; sonnereiser@yandex.ru

⁵Kemerovo State University, ul. Krasnaya, 6, Kemerovo, 650000, Russian Federation; alexaz58@yandex.ru

⁶Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, s. Molochnoe, Vologda, Vologda Region, 160555, Russian Federation; elena-kulikova@list.ru

⁷Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; surina_ea@sevniih-arh.ru

Received on December 26, 2020 / Approved after reviewing on March 23, 2021 / Accepted on March 25, 2021

Abstract. Creation of plantations of the most popular species of forest berry plants with high nutritional and medicinal value is advisable in connection with the reduction of such natural resources and the increased demand for berry products, as well as for the biological reclamation of depleted peat deposits. The paper shows the research results of clonal micropropagation of forest berry plants (cranberry, American cranberry, half-high blueberry, Arctic bramble, lingonberry, Kamchatka bilberry) of promising cultivars and forms using various types of lighting (white LED lamps, LED lamps with a combination of white, red and blue spectra, as well as white fluorescent lamps). Plants were cultivated using WPM and MS nutrient media with the addition of cytokinins 2-iP and 6-BAP in various concentrations. The largest number (3.3–16.9 pcs) and the maximum total length (13.8–251.1 cm) of microshoots of cranberry (Dar Kostromy cultivar, hybrid form 1-15-635), American cranberry (Ben Lear cultivar, hybrid form 1-23-3), Arctic bramble (Anna cultivar, hybrid form K-1), lingonberry (Kostromskaya rozovaya and Rubin cultivars) and Kamchatka bilberry (Sakhalinskaya and Kurilskaya forms) were observed under lighting by LED lamps with a combination of white, red and blue spectra at the “proper micropropagation” stage. The formation of the largest number (13.1 pcs) and the maximum length (98.7 cm) of microshoots of half-high blueberry (Northblue cultivar, hybrid form 23-1-11) was observed under lighting by white fluorescent lamps. There were no significant differences in biometric parameters of plants under different types of lighting depending on cultivars and forms. The use of LED lamps with a combination of white, red and blue spectra has a significant effect on the formation of microshoots of forest berry plants during clonal micropropagation.

Keywords: clonal micropropagation, *in vitro*, lighting, lighting effects on plants, LED lamps, berry plants, cranberry, blueberry, Arctic bramble, lingonberry, Kamchatka bilberry

For citation: Makarov S.S., Upadyshev M.T., Kuznetsova I.B., Zaushintsena A.V., Kulikova E.I., Surina E.A. The Use of Lighting of Various Spectral Ranges for Clonal Micropropagation of Forest Berry Plants. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 82–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-82-93>

Введение

Наиболее полное использование лесных ресурсов, включая вовлечение недревесной продукции леса, в настоящее время является одной из актуальных проблем в организации многоцелевого, рационального и неистощительного лесопользования при решении главных задач развития лесного комплекса РФ [9]. Однако вследствие постоянно усиливающегося антропогенного влияния, в особенности в лесах таежной зоны и зоны хвойно-широколиственных лесов европейской части России, появляются тенденции сокращения запасов редких и хозяйственно-ценных видов лесных ягодных растений, уменьшения их продуктивности. Помимо этого, на территории центрально-европейской части России, преи-

мущественно на землях лесного фонда, не решена проблема рекультивации неиспользуемых земель, вышедших из промышленного оборота, в частности выработанных торфяных месторождений. В силу своего низкого плодородия и высокой кислотности торфяники являются малоперспективными для лесохозяйственного и сельскохозяйственного использования. Более того идут процессы разрушения болотных экосистем, сокращения численности и уничтожения популяций их обитателей, уменьшения запасов грунтовых, подземных и поверхностных вод – значительно повышается риск возникновения торфяных пожаров, последующего атмосферного загрязнения продуктами сгорания и негативного влияния на значительные территории [11, 15, 22–25].

Однако в условиях южно-таежного лесного района европейской части России (Костромская область) есть положительный опыт выращивания в условиях выработанных торфяников различных лесных ягодных растений, таких как клюква болотная (*Oxycoccus palustris* Pers.), клюква крупноплодная (*O. macrocarpus* Pers.), голубика узколистная (*Vaccinium angustifolium* Ait.), голубика полувысокая (*V. corymbosum* L. × *V. angustifolium* Ait.), брусника обыкновенная (*V. vitis-idaea* L.), красника (*V. praestans* Lamb.), княженика арктическая (*Rubus arcticus* L.), морошка приземистая (*R. chamaemorus* L.) и других, в том числе сортов и перспективных гибридных форм [5, 11]. При этом сорта и гибриды перечисленных растений имеют большие урожайность и крупноплодность по сравнению с дикорастущими экземплярами, что при высокой пищевой и лекарственной ценности этих видов и растущем спросе на ягодную продукцию создает перспективы их выращивания в промышленных масштабах.

В связи с этим для биологической рекультивации выработанных торфяных месторождений, повышения продуктивности ягодных угодий (в особенности хозяйственно-ценных, редких видов) и увеличения биоразнообразия лесного фонда необходимо создавать плантации лесных ягодных растений высококачественным сортовым посадочным материалом. Как наиболее эффективный способ выращивания целесообразно использовать метод клонального микроразмножения, позволяющий в течение целого года получать большое количество высококачественного оздоровленного посадочного материала, в том числе плохо размножаемых традиционными способами видов [8]. С 2015 г. клональным микроразмножением перспективных для выращивания в европейской части России сортов и гибридных форм лесных ягодных растений занимаются на Центрально-европейской лесной опытной станции ВНИИЛМ [5–7, 20].

Важнейшим условием для нормального функционирования растений является свет, дающий энергию для осуществления фотосинтеза. Спектральный состав света, а также разные участки спектрального диапазона оказывают специфическое действие на регуляцию различных морфогенетических и физиологических процессов [10, 16]. Например, для этапа размножения растений рода *Rubus* установлено преимущество красного и зеленого света по коэффициенту размножения, синего и зеленого – по длине побегов; для этапа укоренения – красного и синего света, причем последний ингибировал недифференцированный рост каллусных тканей [12]. Для большинства плодовых и ягодных культур комбинированное применение света с долями излучения 87,5 и 12,5 % в красной и синей областях спектра соответственно способствовало достижению высокого эффекта регенерации на различных этапах культивирования эксплантов [13].

При подборе оптимальных источников освещения для растений исследователи все чаще обращаются к белым светодиодам, излучение которых содержит компоненты всех основных полос в диапазоне фотосинтетически активной радиации. При этом белые светодиоды могут применяться как в чистом виде, так и в комбинациях с узкополосными красными и красно-синими светодиодами [18]. Поскольку исследований по влиянию типа освещения на рост и развитие лесных ягодных растений в культуре *in vitro* на сегодняшний день проведено недостаточно [3, 17], результаты опытов в данном направлении имеют научную и практическую ценность.

Цель – изучить влияние света различного спектрального диапазона на ростовые процессы у лесных ягодных растений перспективных сортов и форм при клональном микроразмножении.

Объекты и методы исследования

Исследования по выращиванию в культуре *in vitro* лесных ягодных растений проводили в Лаборатории клонального микроразмножения на базе филиала ВНИИЛМ Центрально-европейской лесной опытной станции по общепринятым методикам [2, 4]. В качестве объектов исследований использовали экспланты растений клюквы болотной (сорт Дар Костромы и гибридная форма 1-15-635), клюквы крупноплодной (сорт Ben Lear и гибридная форма 1-23-3), голубики полувысокой (сорт Northblue и гибридная форма 23-1-11), княженики арктической (сорт Анна и гибридная форма К-1), брусники обыкновенной (сорта Костромская розовая и Рубин) и красники (формы Сахалинская и Курильская).

В условиях световой комнаты при температуре +23...25 °С, влажности 75–80 % и фотопериоде 16/8 ч растения клюквы, голубики и красники культивировали на питательной среде WPM (Woody Plant Medium) [19], княженики – на питательной среде MS (Мурасиге-Скуга) [21], брусники – на питательной среде Андерсона [14]. На этапе собственно микроразмножения в питательную среду добавляли регуляторы роста цитокининовой группы: при выращивании клюквы, голубики, брусники и красники – 2-іР (2-изопентиладенин) в концентрациях 1,0...5,0 мл/л, при выращивании княженики – 6-БАП (6-бензиламинопурин) в концентрации 0,5 мл/л.

Для изучения влияния света на рост и развитие размножаемых растений использовали светодиодные (СД) лампы разного спектрального состава: СД-Б – белого спектра (длина волны $\lambda = 653$ нм); СД-Б+К+С – с комбинацией белого ($\lambda = 653$ нм), красного ($\lambda = 670$ нм) и синего ($\lambda = 455$ нм) спектров. В качестве контроля применяли люминесцентные лампы белого света (ЛБ). В штативах из пенопласта, закрывающих от света корневую систему, размещали и культивировали при постоянном освещении в течение 3 пассажей растения-регенеранты (см. рисунок). Учитывали число и суммарную длину микропобегов в расчете на 1 растение. Опыты проводили в 10-кратной биологической и 2-кратной аналитической повторностях.

Для статистической обработки данных использовали программное обеспечение Microsoft Office 2016 и AGROS v.2.11. Применяли дисперсионный 2-факторный анализ, где фактор А – сорт или форма, фактор В – тип освещения. Достоверность различий между средними данными по вариантам опыта оценивали с помощью наименьшей существенной разности для 5 %-го уровня значимости ($НСР_{05}$).



а



б

Освещение растений-регенерантов светодиодными лампами: а – белого спектра; б – с комбинацией белого, красного и синего спектров

Lighting of regenerated plants with LED lamps: а – white spectrum; б – combination of white, red and blue spectra

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных исследований выявлено, что использование света разного спектрального диапазона оказывает существенное влияние на число побегов клюквы болотной и клюквы крупноплодной. Так, наибольшее число микропобегов (14,9 и 15,2 шт. соответственно) формировалось при освещении растений-регенерантов лампами СД-Б+К+С, что в 1,9 раза больше по сравнению с использованием ламп СД-Б (табл. 1). Существенных различий между показателями по сортам и формам обоих видов не отмечено.

Суммарная длина микропобегов клюквы болотной и клюквы крупноплодной при освещении лампами СД-Б+К+С была в 4,0–4,1 раза больше по сравнению с длиной при использовании ламп СД-Б. У растений клюквы болотной и клюквы крупноплодной гибридных форм суммарная длина микропобегов в 1,2–1,3 раза превосходила данный показатель у растений сортов Дар Костромы и Ben Lear (табл. 1).

Таблица 1

Число микропобегов и их суммарная длина для клюквы в зависимости от сорта и типа освещения
The number of cranberry microshoots and their total length depending on the variety and lighting type

Сорт	Освещение			Среднее
	СД-Б	СД-Б+К+С	ЛБ	
<i>Число микропобегов, шт.</i>				
Клюква болотная (НСР ₀₅ : фактор А – F _φ < F ₀₅ ; фактор В = 1,29; общее = 2,23)				
Дар Костромы	7,3	13,8	7,2	9,4
Гибридная форма 1-15-635	8,6	15,9	7,5	10,7
<i>Среднее</i>	8,0	14,9	7,4	–
Клюква крупноплодная (НСР ₀₅ : фактор А – F _φ < F ₀₅ ; фактор В = 1,21; общее = 2,27)				
Ben Lear	7,6	14,1	7,5	9,7
Гибридная форма 1-23-3	8,8	16,2	7,7	10,9
<i>Среднее</i>	8,2	15,2	7,6	–

Окончание табл. 1

Сорт	Освещение			Среднее
	СД-Б	СД-Б+К+С	ЛБ	
<i>Суммарная длина микропобегов, см</i>				
Клюква болотная (НСР ₀₅ : фактор А = 5,59; фактор В = 7,40; общее = 5,50)				
Дар Костромы	45,7	172,3	36,5	84,8
Гибридная форма 1-15-635	51,3	223,6	46,9	107,3
<i>Среднее</i>	48,5	198,0	41,7	–
Клюква крупноплодная (НСР ₀₅ : фактор А = 5,27; фактор В = 7,32; общее = 5,73)				
Ben Lear	46,4	174,0	37,2	85,9
Гибридная форма 1-23-3	52,6	225,2	42,1	106,6
<i>Среднее</i>	49,5	199,6	39,7	–

При клональном микроразмножении голубики полувысокой в случае освещения люминесцентными лампами формировалось максимальное число микропобегов (в среднем 13,1 шт.) – в 1,3 и 1,6 раза больше, чем при освещении лампами СД-Б и СД-Б+К+С соответственно. Значительных различий по числу микропобегов в зависимости от сорта не отмечено. При освещении люминесцентными полноспектральными лампами суммарная длина микропобегов голубики полувысокой была в 1,6 и 2,5 раза больше, чем при освещении СД-Б и СД-Б+К+С соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Число микропобегов и их суммарная длина для голубики полувысокой в зависимости от сорта и типа освещения
The number of half-high blueberry microshoots and their total length depending on the variety and lighting type

Сорт	Освещение			Среднее
	СД-Б	СД-Б+К+С	ЛБ	
<i>Число микропобегов, шт.</i> (НСР ₀₅ : фактор А – $F_{\phi} < F_{05}$; фактор В = 1,05; общее = 2,08)				
Northblue	9,5	7,9	12,3	9,9
Гибридная форма 23-1-11	10,2	8,3	13,9	10,8
<i>Среднее</i>	9,9	8,1	13,1	–
<i>Суммарная длина микропобегов, см</i> (НСР ₀₅ : фактор А = 3,86; фактор В = 4,11; общее = 6,10)				
Northblue	56,0	40,4	95,9	64,1
Гибридная форма 23-1-11	64,5	38,2	101,5	68,1
<i>Среднее</i>	60,3	39,3	98,7	–

При освещении растений-регенерантов княженики лампами СД-Б+К+С образовывалось наибольшее число микропобегов (в среднем 16,9 шт.), которое было в 2 раза выше по сравнению с результатами, полученными при освещении лампами СД-Б. Существенных различий в зависимости от сорта по числу микропобегов не выявлено. Максимальная суммарная длина микропобегов княженики арктической также наблюдалась при освещении растений-регенерантов лампами СД-Б+К+С и была в 5 раз больше, чем при освещении СД-Б. Существенной разницы между показателями в зависимости от сорта не обнаружено (табл. 3).

Таблица 3

**Число микропобегов и их суммарная длина для княженики арктической
в зависимости от сорта и типа освещения**
**The number of Arctic bramble microshoots and their total length
depending on the variety and lighting type**

Сорт	Освещение			Среднее
	СД-Б	СД-Б+К+С	ЛБ	
<i>Число микропобегов, шт.</i> (НСР ₀₅ : фактор А – $F_{\phi} < F_{05}$; фактор В = 1,21; общее = 2,18)				
Анна	8,5	18,0	5,3	10,6
Гибридная форма К-1	8,2	15,7	6,9	10,3
<i>Среднее</i>	8,4	16,9	6,1	–
<i>Суммарная длина микропобегов, см</i> (НСР ₀₅ : фактор А = 6,56; фактор В = 8,41; общее = 6,60)				
Анна	48,5	271,9	21,5	114,0
Гибридная форма К-1	51,9	230,2	30,1	104,1
<i>Среднее</i>	50,2	251,1	25,8	–

При клональном микроразмножении брусники обыкновенной число микропобегов не зависело от типа освещения и сортовых особенностей. Суммарная длина микропобегов была наибольшей при освещении лампами СД-Б+К+С (в среднем 14,9 см) и в 1,7 и 2,3 раза выше, чем при освещении СД-Б и ЛБ соответственно. Различия между сортами по длине микропобегов несущественные (табл. 4).

Таблица 4

**Число микропобегов и их суммарная длина для брусники обыкновенной
в зависимости от сорта и типа освещения**
**The number of lingonberry microshoots and their total length depending
on the variety and lighting type**

Сорт	Освещение			Среднее
	СД-Б	СД-Б+К+С	ЛБ	
<i>Число микропобегов, шт.</i> (НСР ₀₅ : факторы А, В и АВ – $F_{\phi} < F_{05}$)				
Костромская розовая	3,4	3,5	2,0	3,2
Рубин	3,1	3,1	2,8	2,7
<i>Среднее</i>	3,3	3,3	2,4	–
<i>Суммарная длина микропобегов, см</i> (НСР ₀₅ : фактор А – $F_{\phi} < F_{05}$; фактор В = 1,41; общее = 2,10)				
Костромская розовая	8,9	16,1	7,1	10,7
Рубин	8,7	13,6	5,8	9,4
<i>Среднее</i>	8,8	14,9	6,5	–

Наибольшее число микропобегов у растений красники формировалось при освещении лампами СД-Б+К+С (в среднем 3,6 шт.), это в 1,3 и 1,9 раза превышает данный показатель при освещении лампами СД-Б и ЛБ соответственно. Форма красники Сахалинская характеризовалась несколько более значительной побегообразовательной способностью (на 20 %) по сравнению с формой Курильская. Максимальная суммарная длина микропобегов красники отмечена

при освещении лампами СД-Б+К+С (в среднем 13,8 см) – в 2,3 и 5,5 раза больше, чем в вариантах освещения лампами СД-Б и ЛБ соответственно. При этом различия между формами оказались несущественными (табл. 5).

Таблица 5

Число микропобегов и их суммарная длина для красники в зависимости от формы и типа освещения
The number of Kamchatka bilberry microshoots and their total length depending on the form and lighting type

Форма	Вариант освещения			Среднее
	СД-Б	СД-Б+К+С	ЛБ	
<i>Число микропобегов, шт.</i> (НСР ₀₅ : фактор А – $F_{\phi} < F_{05}$; фактор В = 0,95; общее = 1,08)				
Сахалинская	3,1	3,9	2,0	3,0
Курильская	2,4	3,3	1,8	2,5
<i>Среднее</i>	2,8	3,6	1,9	–
<i>Суммарная длина микропобегов, см</i> (НСР ₀₅ : фактор А – $F_{\phi} < F_{05}$; фактор В = 4,11; общее = 6,10)				
Сахалинская	7,2	15,6	3,1	8,6
Курильская	5,0	12,0	1,8	6,3
<i>Среднее</i>	6,1	13,8	2,5	–

Полученный в результате проведенных исследований положительный эффект от использования светодиодных ламп при культивировании лесных ягодных растений *in vitro* подтверждается данными из научной литературы [3, 17]. Светодиодные источники света могут с успехом применяться на всех этапах микроразмножения, включая укоренение микропобегов. Для земляники садовой использование светодиодных источников света с увеличенной долей красного спектра повышало укореняемость микрочеренков на 15–25 % и число корней – в 1,3–1,8 раза по сравнению с люминесцентными лампами [1]. Для всех изученных культур, за исключением голубики полуввысокой, максимальные биометрические показатели были достигнуты при освещении светодиодными лампами с комбинацией белого, красного и синего спектров. Для голубики высокой предпочтительнее оказалось использование люминесцентных ламп белого спектра. Выявленная специфичность видовой реакции растений на спектральный состав света может быть обусловлена различиями в максимумах поглощения фоторегуляторных пигментов, содержании эндогенных регуляторов роста и других физиологически активных соединений [12, 13].

Заключение

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно заключить, что при клональном микроразмножении растений клюквы болотной, клюквы крупноплодной, княженики арктической, брусники обыкновенной и красники наибольшее число микропобегов максимальной длины формировалось при освещении светодиодными лампами с комбинацией белого, красного и синего спектров. Растения голубики полуввысокой наибольшие показатели роста имели при освещении люминесцентными лампами белого спектра. Существенных различий биометрических показателей в зависимости от сортов и

форм не отмечено, за исключением суммарной длины микропобегов у клюквы, княженики арктической и голубики полуввысокой разных форм. Использование освещения светодиодными лампами с комбинацией спектров перспективно при клональном размножении лесных ягодных растений с целью получения большого количества микропобегов максимальной длины для дальнейшего выращивания их в культуре *in vitro* и последующего создания плантаций посадочным материалом полученных растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бьядовский И.А. Влияние различных по спектральному составу светодиодных источников света на укореняемость земляники садовой (*Fragaria×ananassa*) *in vitro* // Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180, вып. 1. С. 33–37.

Byadovsky I.A. The Effect of Led Light Sources with Varied Spectral Composition on the *in vitro* Rooting Bility of Garden Strawberry (*Fragaria×ananassa*). *Trudy po prikladnoj botanike, genetike i selekcii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding, 2019, vol. 180, no. 1, pp. 33–37. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-33-37>

2. Бьядовский И.А., Упадышев М.Т. Клональное микроразмножение плодовых культур. М.: ФГБНУ ФНЦ Садоводства, 2020. 69 с.

Byadovsky I.A., Upadyshev M.T. *Clonal Micropropagation of Fruit Crops*. Moscow, FSBSO ARHCBAN Publ., 2020. 69 p. (In Russ.).

3. Гудь Л.А., Калашникова Е.А., Тараканов И.Г. Влияние света разного спектрального диапазона на морфогенез ежевики и малины *in vitro* // Лесохоз. информ. 2019. № 2. С. 97–102.

Gud' L.A., Kalashnikova E.A., Tarakanov I.G. Influence of Light of Different Spectral Range on the Morphogenesis of Blackberry and Raspberry *in vitro*. *Forestry information*, 2019, no. 2, pp. 97–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.09>

4. Калашникова Е.А. Клеточная инженерия растений М.: РГАУ–МСХА, 2012. 317 с. Kalashnikova E.A. *Plant Cellular Engineering*. Moscow, RSAU – MTAА Publ., 2012. 317 p. (In Russ.).

5. Корнев И.А., Тяк Г.В., Макаров С.С. Создание новых сортов лесных ягодных растений и перспективы их интенсивного размножения (*in vitro*) // Лесохоз. информ. 2019. № 3. С. 180–189.

Korenev I.A., Tyak G.V., Makarov S.S. Creation of New Cultivars of Forest Berry Plants and the Prospects of Their Intensive Reproduction (*in vitro*). *Forestry information*, 2019, no. 3, pp. 180–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.15>

6. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Смирнов В.С. Совершенствование технологии клонального микроразмножения княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) // Лесохоз. информ. 2018. № 4. С. 91–97.

Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Smirnov V.S. Improving Technology of Clonal Micropropagation of Arctic Bramble (*Rubus arcticus* L.). *Forestry information*, 2018, no. 4, pp. 91–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.4.09>

7. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Упадышев М.Т., Родин С.А., Чудецкий А.И. Особенности клонального микроразмножения клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.) // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 1. С. 67–76.

Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Upadyshev M.T., Rodin S.A., Chudetsky A.I. Clonal Micropropagation of Cranberry (*Oxycoccus palustris* Pers.). *Food Processing: Techniques and Technology*, 2021, vol. 51, iss. 1, pp. 67–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-67-76>

8. Сельскохозяйственная биотехнология и биоинженерия / под ред. В.С. Шевелухи. М.: URSS, 2015. 710 с.

Agricultural Biotechnology and Bioengineering. Ed. by V.S. Shevelukha. Moscow, URSS Publ., 2015. 710 p. (In Russ.).

9. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/pFdqtWFH8y9SfQjDE0Xnwd8eXWoJJMYB.pdf> (дата обращения: 20.10.22).

The Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation for the Period up to 2030: Approved by the Order of the Government of the Russian Federation Dated February 11, 2021 No. 312-p. (In Russ.).

10. Тихомиров А.А., Ушакова С.А. Научные и технологические основы формирования фототрофного звена биолого-технических систем жизнеобеспечения. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева, 2016. 200 с.

Tikhomirov A.A., Ushakova S.A. *Scientific and Technological Foundations for the Formation of a Phototrophic Link in Biological and Technical Life Support Systems*. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2016. 200 p. (In Russ.).

11. Тяк Г.В., Курлович Л.Е., Тяк А.В. Биологическая рекультивация выработанных торфяников путем создания посадок лесных ягодных растений // Вестн. Казан. ГАУ. 2016. Т. 11, № 2(40). С. 43–46.

Tyak G.V., Kurlovich L.E., Tyak A.V. Biological Recultivation of Degraded Peatlands by Creating Forest Berry Plants. *Vestnik of Kazan State Agricultural University*, 2016, vol. 11, no. 2(40), pp. 43–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/20633>

12. Упадышев М.Т. Спектральный состав света при микроразмножении растений родов *Rubus* и *Sorbus* // Докл. РАСХН. 2002. № 6. С. 16–19.

Upadyshev M.T. Spectrum Composition of Light at Microinultiplication of Plants in Species *Rubus* and *Sorbus*. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 2002, no. 6, pp. 16–19. (In Russ.).

13. Упадышев М.Т. Действие света разного спектрального состава при микроразмножении плодовых и ягодных культур // Актуальная биотехнология. 2018. № 3(26). С. 521.

Upadyshev M.T. Effect of Light of Different Spectral Composition during Micropropagation of Fruit and Berry Crops. *Aktual'naya biotekhnologiya*, 2018, no. 3(26), p. 521. (In Russ.).

14. Anderson W.C. Propagation of Rhododendrons by Tissue Culture. 1. Development of a Culture Medium for Multiplication of Shoots. *Proceedings of the International Plant Propagator's Society*, 1975, vol. 25, pp. 129–135.

15. Bussi eres J., Rochefort L., Lapointe L. Cloudberry Cultivation in Cutover Peatland: Improved Growth on Less Decomposed Peat. *Canadian Journal of Plant Science*, 2015, vol. 95, no. 3, pp. 479–489. <https://doi.org/10.4141/cjps-2014-299>

16. Cope K., Bugbee B. Spectral Effects of Three Types of White Light-Emitting Diodes on Plant Growth and Development: Absolute versus Relative Amounts of Blue Light. *HortScience*, 2013, vol. 48, iss. 4, pp. 504–509. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.4.504>

17. Hung C.D., Hong C.-H., Kim S.-K., Lee K.-H., Park J.-Y., Nam M.-W., Choi D.-H., Lee H.-I. LED Light for *in vitro* and *ex vitro* Efficient Growth of Economically Important Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, vol. 38, art. 152. <https://dx.doi.org/10.1007/s11738-016-2164-0>

18. Kang J.H., Kumar S.K., Atulba S.L.S., Jeong B.R., Hwang S.J. Light Intensity and Photoperiod Influence the Growth and Development of Hydroponically Grown Leaf Lettuce in a Closed-Type Plant Factory System. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2013, vol. 54, iss. 6, pp. 501–509. <https://doi.org/10.1007/s13580-013-0109-8>

19. Lloyd G.B., McCown B.H. Commercially-Feasible Micropropagation of Mountain Laurel, *Kalmia latifolia*, by Use of Shoot-Tip Culture. *Combined Proceeding. International Plant Propagators' Society*, 1980, vol. 30, pp. 421–427.

20. Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I., Rodin S.A. Obtaining High-Quality Planting Material of Forest Berry Plants by Clonal Micropropagation for Restoration of Cutover Peatlands. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 2, pp. 21–29. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-21-29>

21. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*, 1962, vol. 15, iss. 3, pp. 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>

22. Noormets M., Karp K., Paal T. Recultivation of Opencast Peat Pits with Vaccinium Culture in Estonia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment. Vol. 64: Ecosystems and Sustainable Development IV*, 2003, vol. 2, pp. 1005–1014. <https://doi.org/10.2495/ECO030242>

23. Palozzi J.E. *Peatland Plant-Soil Feedbacks Dictate Ecosystem Properties and Processes*. Electronic Thesis and Dissertation Repository. Canada, 2017. 86 p. Available at: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4511> (accessed 25.03.21).

24. *Production of Berries in Peatlands*. Peatland Ecology Research Group. Guide Produced under the Supervision of Line Rochefort and Line Lapointe. Quebec, Université Laval, 2009. 134 p.

25. Vahejõe K., Albert T., Noormets M., Karp K., Paal T., Starast M., Värnik R. Berry Cultivation in Cutover Peatlands in Estonia: Agricultural and Economical Aspects. *Baltic Forestry*, 2010, vol. 16, no. 2(31), pp. 264–272.

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

Научная статья
УДК 632.51
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-94-106

Эколого-ценотическая активность видов среднетаежной флоры

И.С. Коновалова[✉], канд. с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [AFO-2859-2022](https://orcid.org/0000-0001-9897-3342),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9897-3342>

Д.Ю. Коновалов, канд. с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [AFN-5480-2022](https://orcid.org/0000-0003-3729-4674),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3729-4674>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; i.konvalova@narfu.ru[✉], d.konvalov@narfu.ru

Поступила в редакцию 11.01.21 / Одобрена после рецензирования 16.04.21 / Принята к печати 20.04.21

Аннотация. Контроль за основными растениями-засорителями лесохозяйственных объектов всегда играл важную роль в процессе искусственного лесоразведения. Разработка научно-обоснованных мероприятий, в первую очередь на площадях лесных питомников, основывается на выявлении особенностей формирования, функционирования и активности сеgetальных видов растений. Цель исследования – разработка и адаптация научно-обоснованных подходов к контролю за сорными видами лесных питомников среднетаежной зоны Европейского Севера на основе проведения анализа экологической принадлежности видов к определенному агрофитоценозу и дифференциации видов по характеру эколого-ценотических связей. Данные о растениях получены в условиях лесных питомников на северо-западе России. Разнообразие растительных сообществ изучали маршрутным методом по всей территории лесохозяйственных агроценозов, выполняя геоботанические описания напочвенного покрова. Отмечали проективное покрытие видов сосудистых растений. Результаты позволили выявить следующие закономерности: в составе сеgetальной флоры преобладает группа преимущественно сорных видов растений, состоящая из эвритопных и активных сорных видов (42 %); стенотопные и гемистенотопные виды растений, так называемые типичные, или верные виды комплексов, составляют 34 %; завершают ряд факультативные виды растений (24 %). Систематизация большого объема научных данных стала основой для теоретического обоснования и осуществления на практике мониторинга наиболее активных видов растений в агрофитоценозах лесных питомников. Проведенный комплексный анализ растительных сообществ лесных питомников позволил авторам предложить свою флористическую классификацию растительности. Представленная классификация учитывает все флористические и экологические различия между изученными сообществами и может быть использована при осуществлении контроля за сорными растениями в условиях северной части Русской равнины.

Ключевые слова: эколого-ценотическая структура, флористический состав, сеgetальные виды, классификация видов, лесной питомник, активность видов, сорные растения, влияние сорных растений на растительные сообщества, северо-запад России

Для цитирования: Коновалова И.С., Коновалов Д.Ю. Эколого-ценотическая активность видов среднетаежной флоры // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 94–106. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-94-106>

Original article

Ecological and Cenotic Activity of Species of the Middle Taiga Flora

Irina S. Konovalova[✉], Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AFO-2859-2022](https://orcid.org/0000-0001-9897-3342),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9897-3342>

Denis Yu. Konovalov, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AFN-5480-2022](https://orcid.org/0000-0003-3729-4674),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3729-4674>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; i.konovalova@narfu.ru[✉],
d.konovalov@narfu.ru

Received on January 11, 2021 / Approved after reviewing on April 16, 2021 / Accepted on April 20, 2021

Abstract. The control of the main weeds of forestry objects has always played an important role in forestry. The development of evidence-based measures, primarily in the areas of forest nurseries, relies on identifying the features of formation, functioning and activity of segetal plant species. The research aims at developing and adapting evidence-based approaches to the weed control in forest nurseries of the middle taiga zone of the European North by analyzing the ecological status of species in a particular agrophytocenosis and by differentiating species according to the nature of ecological and cenotic relationships. Data on plants was obtained in forest nurseries of Northwestern Russia. The diversity of plant communities was studied by route method throughout the forest agrocenoses, carrying out geobotanical descriptions of the ground cover. The projective cover of vascular plants was observed when describing the vegetation. The results revealed the following regularities: segetal flora is dominated by a group of predominantly weed species, consisting of eurytopic and active weed species (42 %); stenotopic and hemistenotopic plant species, the so-called typical or faithful complex species, represent 34 %; facultative plant species complete the series (24 %). The systematization of a large amount of scientific data became the basis for the theoretical substantiation and implementation in practice of monitoring the most active plant species in agrophytocenoses of forest nurseries. A comprehensive analysis of plant communities of forest nurseries allowed the authors to propose their floristic classification of vegetation. The presented classification considers all the floristic and ecological differences between the studied communities and can be used in the weed control in the northern part of the Russian plain.

Keywords: ecological and cenotic structure, floristic composition, segetal species, species classification, forest nursery, species activity, weed plants, effect of weed plants on plant communities, Northwest Russia

For citation: Konovalova I.S., Konovalov D.Yu. Ecological and Cenotic Activity of Species of the Middle Taiga Flora. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 94–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-94-106>

Введение

Растительные сообщества отличаются большим количеством характерных признаков и взаимосвязей между членами сообщества. Одним из важнейших признаков является флористический состав растительных сообществ. Под воздействием антропогенных факторов структура флористических сообществ претерпевает ряд изменений. С одной стороны, эти изменения закономерны,

с другой, таким сообществам присущи стохастические, или случайные, изменения из-за влияния внешних факторов. Ряд авторов [18, 20, 23, 24] отмечают, что ключевым фактором видового разнообразия растений в фитоценозах является экологический диапазон их местообитания, границы которого определяют благоприятность условий для роста отдельных видов растений.

Различия видового состава растительности трансформированных экотопов зависят в первую очередь от характера и степени антропогенного воздействия, в том числе его вида (прополка, обработка гербицидами и др.) и периодичности. Видовому составу антропогенных экотопов присуща определенная стабильность. Однако из-за последующих нарушений сообщества претерпевают некоторые изменения в связи с необходимостью приспособления и адаптации к новым условиям. Такие изменения происходят в результате влияния на сообщества разнообразных внешних и внутренних причин, а также их комбинаций.

Анализ научной литературы [8, 9, 17, 18] позволяет сделать вывод о значительно большем флористическом многообразии вновь сформированных «открытых» фитоценозов по сравнению с исходными. В изменяющихся условиях достаточно оперативно происходит трансформация растительных сообществ и формируются новые сомкнутые пионерные фитоценозы. Видовые составы различных фитоценозов могут существенно различаться. Подобного рода вариативность не в последнюю очередь связана с воздействием на растительные сообщества различных внешних факторов. К числу таких факторов относится удаленность лесохозяйственных агроценозов от границ сельскохозяйственных земель и населенных пунктов. Так, зависимость флористического состава вырубок и лесных питомников от расстояний до антропогенных ландшафтов отмечали в своих работах А.М. Крышень, Н.Г. Уланова и др. [9, 17, 18].

При исследовании структуры фитоценоза необходимо применять комплексный анализ растительных сообществ. В первую очередь рекомендуется выполнить количественный анализ, в ходе которого выделяются индикаторные виды, растения-доминанты и т. д., что позволяет определить общую структуру сообществ. Для вновь сформированных растительных сообществ не редки случаи, когда индикаторные для данного биотопа виды растений встречаются эпизодически, а нехарактерные виды, напротив, обильно представлены. Поэтому количественные показатели численности видов в сообществах не совсем точно характеризуют их привязанность к фитоценозу. Возникает необходимость установления взаимосвязи статуса вида растения по отношению к конкретному местообитанию.

Широта эколого-ценотической амплитуды видов отражает распределение их в спектре синтаксонов конкретного региона. Цель исследования – разработка и адаптация научно-обоснованных подходов к контролю за сорными видами в лесных питомниках среднетаежной зоны Европейского Севера на основе проведения анализа экологической принадлежности видов к определенному агрофитоценозу и дифференциации видов по характеру эколого-ценотических связей.

Объекты и методы исследования

Методологической основой исследования послужили труды российских и зарубежных ученых: лесоводов, экологов, ботаников, лесокulturников [4–6, 8–10, 16, 22, 25 и др.].

Вопросы классификации растительности неразрывно связаны с именем основателя эколого-флористического подхода Жозиаса Брауна-Бланке. Один из крупнейших геоботаников XX в. предложил метод классификации, основанный на группировке сообществ на базе такого показателя, как «верность вида».

Верность вида – это показатель привязанности вида к определенной ассоциации, формации или типу растительности. Различаются следующие градации шкалы Брауна-Бланке [11, 12, 21]: 5 – верные виды (эуценные, ценобионтные), встречающиеся только в 1 категории растительности (в 1 типе биотопа); 4 – постоянные (преферентные, ценофильные), встречающиеся преимущественно в данной категории растительности (типе биотопа); 3 – благосклонные (тихоценные), встречающиеся в разных биотопах, но предпочитающие данную категорию растительности; 2 – спутники (убиквисты, аценные, эвритоппные), встречающиеся в разнообразных ассоциациях; 1 – случайные (ксеноценные), чуждые данной категории растительности, попавшие сюда случайно.

Определить верность вида тому или иному типу сообщества или группам сообществ позволяют так называемые фитоценотические связи. В исследованиях возможно [2, 3, 11, 12] использование различных подходов для установления уровня верности вида, к числу которых относятся корреляционный анализ межвидовых сопряженностей, прямой градиентный и классификационный виды анализа. Последний базируется на методе флористической классификации растительности, являющемся, по мнению А.Д. Булохова [2, 3], наиболее эффективным – он основан на установлении верности видов определенным типам сообществ. Наглядным показателем верности в данном случае выступает класс постоянства вида в сообществах синтаксонов.

Н.Ф. Реймерс в своей работе [14] выделял 4 группы верности видов: 1 – виды-индикаторы (стенобионтные виды), способные существовать в строго определенных, узко ограниченных условиях окружающей среды; 2 – верные виды, населяющие несколько природных разностей и достигающие в некоторых из них наивысшей для себя численности; 3 – постоянные виды, произрастающие в широком круге биотопов; 4 – случайные виды. Автор подчеркивал необходимость учета антропогенных условий заселения видов. Применительно к постоянным видам, видам-индикаторам и верным видам он выделял 2 формы: аборигенные и виды, вошедшие в состав комплекса в результате антропогенного воздействия.

Классификация, предложенная профессором Б.А. Юрцевым [5], предусматривала 5-балльную оценку ландшафтной активности видов и включала такие критерии, как разнообразие видового состава экотопов, обилие и постоянство видов, а также равномерность их распределения по площади.

Сорный компонент лесных питомников изучали в 2007–2015 гг. в условиях средней подзоны тайги Архангельской области. Маршрутным методом обследовали поля на продуцирующей (посевное отделение, школьное отделение) и вспомогательной (хозяйственный участок, прикопочный участок, компостник, обочины дорог) площадях 5 постоянных лесных питомников: Няндомского, Плесецкого, Каргопольского, Коношского, Устьянского [1].

При осуществлении научного эксперимента уделяли внимание методике работы, возможностям ее улучшения и сопоставлению результатов, полученных различными методами. Разнообразие растительных сообществ изучали по всей территории лесных питомников, выполняя геоботанические описания почвенного покрова на учетных площадках размером 1 м². При описании растительности

отмечали проективное покрытие всех видов сосудистых растений, количество растений. Обилие сорных видов оценивали глазомерно по шкале А.И. Мальцева [15]. С этой целью в зависимости от микрорельефа местности на каждом опытном участке закладывали не менее 10–12 площадок учета по 1 м². Всего заложено приблизительно 400 учетных площадок.

Эколого-ценотическую активность видов определяли по широте спектра присутствия видов на исследованных полях лесных питомников. При характеристике экологической амплитуды видов сеgetальной флоры лесных питомников исследуемые площадки растительности объединили в группы, или флороценотические комплексы (флорокомплексы) (рис. 1) [10].

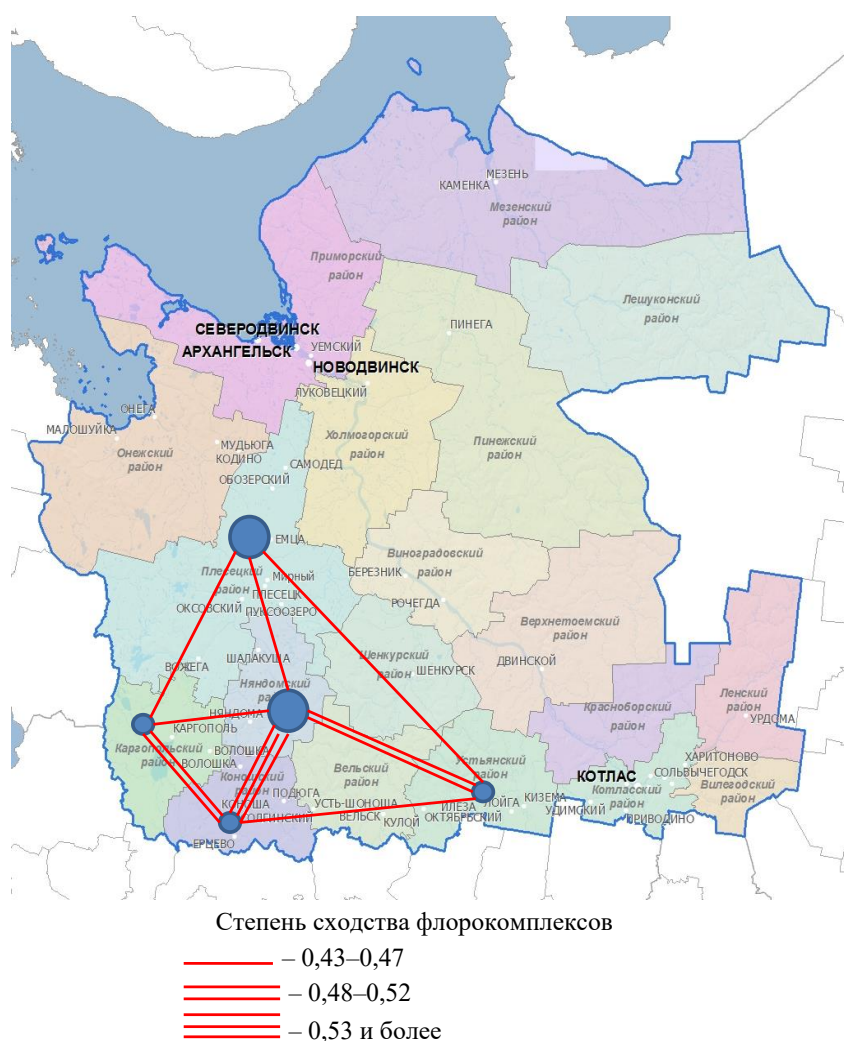


Рис. 1. Граф видового сходства флороценотических комплексов

Fig. 1. Scheme of species similarity of florocenotic complexes

Эколого-флористический (или флороценотический) комплекс рассматривается нами как сформировавшаяся в определенных условиях совокупность

видов растений, имеющих сходный эколого-ценотический потенциал. Уровень сходства видового состава исследуемых флорокомплексов в соответствии с рассчитанными значениями коэффициентов Жаккара варьирует от 0,43 до 0,53; родового состава – от 0,48 до 0,60; состава семейств – от 0,58 до 0,85.

Отличительные черты каждого флорокомплекса в процессе формирования определяются характером его функционального происхождения и, как следствие, топографией местности. Особое значение имеет степень нарушенности почв как один из ключевых абиотических факторов.

Результаты исследования и их обсуждение

В своей работе [7] анализ растительного компонента мы проводили на основе методов оценки активности растений Б.А. Юрцева и Я.П. Дидука [5]. Принятая нами классификация видов синтезирует адаптированные к флоре лесных питомников частные подходы по исследованию активности видов. В основу предложенной *классификации видов растений по широте эколого-ценотической амплитуды (по степени верности видов)* легли различные подходы и опыт исследователей-геоботаников [2, 3, 5, 11–13, 21 и др.].

В результате эксперимента все отмеченные виды сегетальной флоры лесных питомников разделены нами на 5 классов, или фитоценоциклов. Под фитоценоциклом понимаем совокупность всех растительных группировок, в которых отмечен данный вид [9]. При распределении по классам каждому виду растений присвоены соответствующие баллы:

1-й класс – стенотопный (эуценный, самый узкий) фитоценоцикл: вид встречается на 1 участке в составе 1 флороценотического комплекса данного региона. Это исконно верные виды, обитающие в данном типе биоценоза и являющиеся индикаторными видами;

2-й класс – гемистенотопный (ценофильный) фитоценоцикл: вид встречается на нескольких участках в составе 1 флороценотического комплекса. Это верные виды, занимающие одинаковые или экологически близкие типы биоценоза, предпочтительные для данного вида. Могут быть условно индикаторными видами;

3-й класс – гемизвритоппный (политопный) фитоценоцикл: вид встречается в составе 2 типов флороценотических комплексов данного региона. Это политопные виды, обитающие в разных экосистемах нескольких ландшафтов;

4-й класс – эвритоппный (аценный, самый широкий) фитоценоцикл: вид встречается в составе большинства типов комплексов данного региона. Эти виды, обитающие в большинстве флорокомплексов, представлены в табл. 1;

5-й класс – активный сорный фитоценоцикл: вид встречается в каждом типе комплексов данного региона. Эти виды, наиболее распространенные сорные виды в лесных питомниках исследуемого региона, представлены в табл. 2.

Учитывая многочисленность, схожесть критериев и механизмов формирования рассмотренных фитоценоциклов, все обозначенные выше классы объединены нами в 3 группы видов (рис. 2): группа типичных видов растений содержит виды, относящиеся к 1-му и 2-му классам (стенотопный и гемистенотопный фитоценоциклы); группа факультативных видов растений включает 3-й класс (гемизвритоппный фитоценоцикл); группа преимущественно сорных видов состоит из видов 4-го и 5-го классов (эвритоппный и активный сорный фитоценоциклы).

Таблица 1

Эвритопный фитоценоцикл
Eurytopic phytocenose

Семейство	Вид	Флороценологический комплекс						
		Няндом-ский	Карго-польский	Плесец-кий	Конош-ский	Устьян-ский		
Хвощевые (<i>Equisetaceae</i>)	*Хвоц полевой (<i>Equisetum arvense</i> L.)	+	-	++	++	++	++	
	Вейник наземный (<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth.)	+	+	+	++	-		
Злаковые (<i>Poaceae</i>)	Пахучеколосник душистый (<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.)	-	+	-	+	+		
	Лисохвост луговой (<i>Alopecurus pratensis</i> L.)	-	+	+	-	+		
	Овсяница луговая (<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	++	+++	+++	++	-		
	Ежа сборная (<i>Dactylis glomerata</i> L.)	+	+	++	++	-		
Лютиковые (<i>Ranunculaceae</i>)	Лютик едкий (<i>Ranunculus acris</i> L.)	-	-	+	+	+		
Крапивные (<i>Urticaceae</i>)	* ● Крапива двудомная (<i>Urtica dioica</i> L.)	-	++	+	+	-		
	* ▲ Звездчатка средняя (<i>Stellaria media</i> (L.) Willd.)	+	+	+	+	-		
Гвоздичные (<i>Scrophulariaceae</i>)	* Δ ▲ Цавель конский (<i>Rumex confertus</i> Willd.)	-	++	+	++	+		
	* ▲ Фиалка полевая (<i>Viola arvensis</i> Murr.)	++	+	-	+	+		
Фиалковые (<i>Violaceae</i>)	* Фиалка трехцветная (<i>Viola tricolor</i> L.)	++	+	-	+	+		
Вересковые (<i>Ericaceae</i>)	Толокнянка обыкновенная (<i>Arctostaphylos uva-ursi</i> (L.) Spreng.)	+	+	+	-	-		
	Земляника лесная (<i>Fragaria vesca</i> L.)	+	+	-	+	+		
Розовые (<i>Rosaceae</i>)	Роза иглистая (<i>Rosa acicularis</i> Lindl.)	+	+	-	+	+		
	* Δ ● Донник белый (<i>Melilotus albus</i> Medik.)	-	+	+	++	-		
Бобовые (<i>Fabaceae</i>)	* Чина луговая (<i>Lathyrus pratensis</i> L.)	-	+	+	+	+		
	* Выюнок полевой (<i>Convulvulus arvensis</i> L.)	+	+++	-	+	+		
Вьюнковые (<i>Convolvulaceae</i>)	* Незабудка полевая (<i>Myosotis arvensis</i> (L.) Hill)	+	+++	++	+	-		
Бурчатниковые (<i>Borraginaceae</i>)	* Вероника дубравная (<i>Veronica chamaedrys</i> L.)	+	+	+	+	-		
Норичниковые (<i>Scrophulariaceae</i>)	* Колокольчик раскидистый (<i>Campanula patula</i> L.)	-	++	++	++	-		
	* Тысячелистник обыкновенный (<i>Achillea millefolium</i> L.)	++	+	+++	++	-		
Сложноцветные (<i>Asteraceae</i>)	* Пижма обыкновенная (<i>Tanacetum vulgare</i> L.)	+	-	+	-	+		
Всего видов / семейств		15/10	20/12	17/11	20/13	12/9		

Примечание: * – сорный по А.М. Шмидту [19]; Δ – заносный; ▲ – сегетально-рудеральный; ● – преимущественно рудеральный [19]; + – встречается редко; ++ – встречается часто, если доминирует, то на небольших участках; +++ – доминирует на значительной территории; -- – отсутствует.

Таблица 2

Активный сорный фитоценоцикл
Active weed phytocenocycle

Семейство	Вид	Флороценоотический комплекс				
		Няндом-ский	Карго-польский	Плесец-кий	Конош-ский	Устьян-ский
Злаковые (<i>Poaceae</i>)	Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski)	+++	+++	+++	+++	+
	Щучка дернистая (<i>Deschampsia caespitosa</i> (L.) Beauv.)	+++	+++	+++	+++	++
	Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L.)	+	+++	++	+	++
	* Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L.)	++	++	++	++	++
Лютиковые (<i>Ranunculaceae</i>)	* Лютик ползучий (<i>Ranunculus repens</i> L.)	+	++	++	+	++
	* Звездчатка злаковидная (<i>Stellaria graminea</i> L.)	+	+	+++	+	+
Гвоздичные (<i>Sagorophyllaceae</i>)	* О Торица обыкновенная (<i>Spergula arvensis</i> L.) (<i>S. vulgaris</i> Voenn.)	++	+	++	+	+
	* ▲ Марь белая (<i>Chenopodium album</i> L.)	+	+	++	+	+
Гречишные (<i>Polygonaceae</i>)	* Щавель малый, шавелек (<i>Rumex acetosella</i> L.)	+	+	+	+	+
	* ▲ Пастушья сумка (<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medik.)	++	+	++	+	+
Крестоцветные (<i>Brassicaceae</i>)	Клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i> L.)	++	++	++	++	+
	Клевер ползучий (<i>Trifolium repens</i> L.)	++	++	+++	++	+
	* Горошек мышиный (<i>Vicia cracca</i> L.)	++	+++	+++	++	++
Кипрейные (<i>Onagraceae</i>)	Хамерион узколистный, иван-чай узколистный (<i>Chamerion angustifolium</i> (L.) Holub)	++	++	++	+	+

Окончание табл. 2

Семейство	Вид	Флороценологический комплекс				
		Няндом-ский	Карто-польский	Плесец-кий	Конош-ский	Устьян-ский
Норичниковые (<i>Scrophulariaceae</i>)	Лянка обыкновенная (<i>Linaria vulgaris</i> L.)	+	+	+	++	++
Подорожниковые (<i>Plantaginaceae</i>)	* ● Подорожник большой (<i>Plantago major</i> L.)	+	++	++	+	++
Губоцветные (<i>Labiatae</i>)	* Черноголовник обыкновенный (<i>Prunella vulgaris</i> L.)	+	+	++	++	+
	* Нивяник обыкновенный, поповник (<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.)	++	+++	++	+++	+
Сложноцветные (<i>Asteraceae</i>)	* ● Ромашка ромашковидная, ромашка пахучая (<i>Chamomilla suaveolens</i> (Pursh) Rydb.)	++	+++	++	++	+
	* Мать-и-мачеха обыкновенная (<i>Tussilago farfara</i> L.)	+	+	++	++	+
	* ▲ Бодяк полевой (<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.)	++	++	++	++	++
	* ▲ Осот полевой (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	++	+++	++	++	++
	Одуванчик лекарственный (<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.)	+	++	++	+	+
	Всего видов / семейств	23/12	23/12	23/12	23/12	23/12

Примечание: ○ – преимущественно сегетальный.

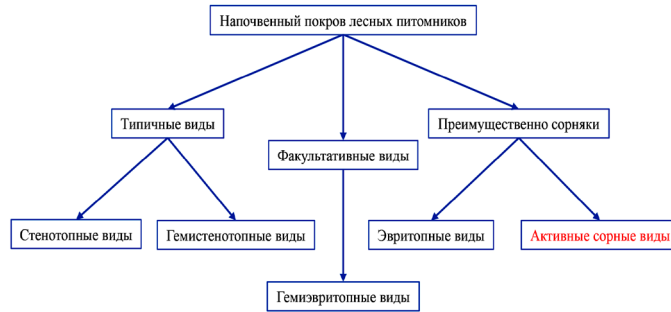


Рис. 2. Схема дифференциации растений напочвенного покрова по широте эколого-ценотической амплитуды (по степени верности видов)

Fig. 2. The differentiation scheme of ground cover plants by the breadth of ecological and cenotic range (by species fidelity)

Следует заметить, что группы и классы верности видов несколько условны и имеют значение на региональном уровне.

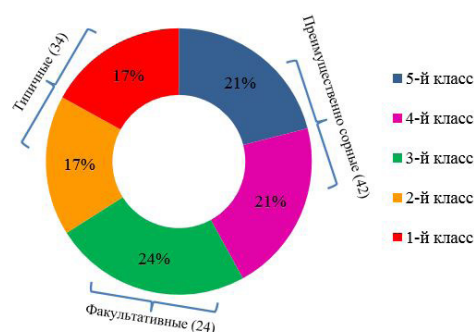
Таким образом, все виды растений напочвенного покрова во всех флоро-комплексах лесных питомников Архангельской области были распределены по критерию характера эколого-ценотической связи.

Суммируя сказанное, следует отметить важность соотнесения (в рамках конкретных условий) 2 ключевых аспектов оценки активности видов: потенциальных возможностей вида и текущего состояния его ценопопуляции. В связи с этим активность вида нужно рассматривать как индивидуальный биологический потенциал изменчивости, заложенный генетически и направленный прежде всего на поддержание гетерогенности и подвижности ценопопуляций, являющихся основой естественного отбора, что формирует адаптивные признаки и ответные реакции на внешние воздействия.

Полученные результаты позволили выявить следующие закономерности. В составе сегетальной флоры преобладает группа преимущественно сорных видов растений, состоящая из эвритопных и активных сорных видов (42 %). Стенотопные и гемистенотопные виды растений, так называемые типичные, или верные, виды комплексов, составляют 34 %. Завершают ряд факультативные виды растений (24 %) (рис. 3).

Рис. 3. Распределение видов (%) в соответствии с флористической классификацией растительности

Fig. 3. Species distribution (%) according to the vegetation floristic classification



При сравнении списков растений напочвенного покрова лесных питомников выявляется следующая динамика: наиболее распространены активные сорные виды (32...55 %) и эвритопные виды (28...31 %), которые составляют группу преимущественно сорных видов растений (табл. 3).

Таблица 3

Распределение видов по классам эколого-ценотической амплитуды
Species distribution by classes of ecological and cenotic range

Класс	Флороценотический комплекс									
	Няндомский		Каргопольский		Плесецкий		Коношский		Устьянский	
	абсолютное	%	абсолютное	%	абсолютное	%	абсолютное	%	абсолютное	%
1-й	1	2	7	10	4	7	5	7,5	1	2
2-й	4	7	11	15,5	2	4	1	1,5	1	2
3-й	11	20	10	14	8	15	18	27	5	12
4-й	15	28	20	28	17	31	20	30	12	29
5-й	23	43	23	32,5	23	43	23	34	23	55
<i>Итого</i>	54	100	71	100	54	100	67	100	42	100

Гемизвритоный фитоценоцикл (12...27 %), или факультативная группа растений, в экологическом отношении оказался очень разнообразным. При этом можно отметить низкую долю типичных для данных местообитаний видов растений, условно называемых стенотопным (2...10 %) и гемистенотопным (2...16 %) фитоценоциклами, встречаемых в пределах 1 флорокомплекса.

Результаты многолетних исследований позволяют сделать вывод о том, что большинство видов растений антропогенных экотопов характеризуются высокой экологической пластичностью. Это подтверждается данными табл. 3. Виды, обладающие широкой экологической амплитудой, имеют гораздо большую биологическую приспособленность к произрастанию в экстремальных условиях.

Заключение

Предложенная нами классификация верности видов напочвенного покрова лесохозяйственных агроценозов расширяет возможности для оценки качественных характеристик экологической структуры сеgetальной флоры. Классификация отражает активную долю сорно-полевых видов – основных засорителей лесных питомников в регионе, – которую необходимо учитывать при контроле за сорными растениями.

В результате проведенных исследований пришли к выводу, что в составе сеgetальной флоры лесных питомников средней подзоны тайги Архангельской области преобладает группа преимущественно сорных видов растений (42 %): наиболее распространены активные сорные (32...55 %) и эвритоные (28...31 %) виды. Стенотопные и гемистенотопные виды растений, так называемые типичные, или верные виды, составляют 34 % от всех отмеченных в лесных питомниках Архангельской области видов. При этом доля стенотопных (2...10 %) и гемистенотопных (2...16 %) видов растений в пределах 1 флорокомплекса низкая. Завершают ряд факультативные виды растений (24 %).

Проведенная апробация предложенной нами классификации видов сорных растений по широте эколого-ценотической амплитуды (по степени верности видов) на сеgetальной флоре лесных питомников Архангельской области показала практическую пригодность данной классификации в качестве базы для оценки флоры лесохозяйственных агроценозов и контроля за основными засорителями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Нечаева И.С. Сорная растительность лесных питомников: моногр. Архангельск: САФУ, 2010. 187 с.
Babich N.A., Nechaeva I.S. *Weed Vegetation of Forest Nurseries: Monograph*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 187 p. (In Russ.).
2. Булохов А.Д. Травяная растительность Юго-Западного Нечерноземья России. Брянск, 2001. 296 с.
Bulokhov A.D. *Herbaceous Vegetation of the South-Western Nonchernozem Zone of Russia*. Bryansk, 2001. 296 p. (In Russ.).
3. Булохов А.Д., Семеншченков Ю.А., Панасенко Н.Н., Харин А.В. Фитоценотические связи как критерий сохранения редких видов региональной флоры // Бюл. Брян. отд-ния РБО. 2016. № 1(7). С. 10–22.
Bulokhov A.D., Semenishchenkov Yu.A., Panasenko N.N., Kharin A.V. Phytocenotic Connections as a Criterion for the Regional Flora Rare Species Conservation. *Bulletin of the Bryansk Department of the Russian botanical society*, 2016, no. 1(7), pp. 10–22. (In Russ.).
4. Гнатюк Е.П., Крышень А.М. Методы исследования ценофлор (на примере растительных сообществ вырубок Карелии). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 68 с.
Gnatyuk E.P., Kryshen' A.M. *Methods for Investigating Coenofloras (Example of Plant Communities in Harvested Forest Areas in Karelia)*. Petrozavodsk, KarSC RAS Publ., 2005. 68 p. (In Russ.).
5. Дидух Я.П. Проблемы активности видов растений // Ботан. журн. 1982. Т. 67, № 7. С. 925–935.
Didukh Ya.P. The Problems in the Activity of Plant Species. *Botanicheskii Zhurnal*, 1982, vol. 67, no. 7, pp. 925–935. (In Russ.).
6. Захаренко А.В. Теоретические основы управления сорным компонентом агрофитоценоза в системах земледелия. М.: МСХА, 2000. 466 с.
Zakharenko A.V. *Theoretical Foundations for Managing the Agrophytocenosis Weed Component in Farming Systems*. Moscow, MSKhA Publ., 2000. 466 p. (In Russ.).
7. Коновалова И.С., Бабич Н.А., Марич С.Н. Фитоценотическая значимость сорных растений лесных питомников // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 1. С. 37–44. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/75e/2014_01_lh03.pdf
Konovalova I.S., Babich N.A., Marich S.N. Phytocenotic Importance of Weed Plants in Forest Nurseries. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 1, pp. 37–44. (In Russ.).
8. Крышень А.М. Структура и динамика растительного сообщества вейниковой вырубки в Южной Карелии. 1. Видовой состав // Ботан. журн. 2003. Т. 88, № 4. С. 48–62.
Kryshen A.M. Structure and Dynamics of Small-Reed Clear-Cutting Community in Southern Karelia. 1. Species Composition. *Botanicheskii Zhurnal*, 2003, vol. 88, no. 4, pp. 48–62. (In Russ.).
9. Крышень А.М. Растительные сообщества вырубок Карелии. М.: Наука, 2006. 262 с.
Kryshen A.M. *Plant Communities of Cuttings in Karelia*. Moscow, Nauka Publ., 2006. 262 p. (In Russ.).
10. Крышень А.М. К вопросу о механизмах устойчивости и развития растительных сообществ // Актуал. проблемы геоботаники. III Всерос. шк.-конф. Лекции. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 157–175.
Kryshen A.M. On the Issue of Mechanisms of Sustainability and Development of Plant Communities. *Current Issues of Geobotany. The III All-Russian School-Conference. Lectures*. Petrozavodsk, KarSC RAS Publ., 2007, pp. 157–175. (In Russ.).
11. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Краткий энциклопедический словарь науки о растительности. Уфа: Гилем; Башк. энцикл., 2014. 288 с.
Mirkin B.M., Naumova L.G. *A Concise Encyclopedic Dictionary of Vegetation Science*. Ufa, Gilem, Bashkirskaya entsiklopediya Publ., 2014. 288 p. (In Russ.).
12. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Введение в современную науку о растительности. М.: ГЕОС, 2017. 280 с.

- Mirkin B.M., Naumova L.G. *Introduction to Modern Vegetation Science*. Moscow, GEOS Publ., 2017. 280 p. (In Russ.).
13. Палкина Т.А. Флористический состав сорного компонента агроценозов на территории Рязанской области // Изв. ТСХА. 2011. Вып. 4. С. 44–55.
Palkina T.A. Floristic Composition of the Weed Component of Agrocenoses in the Rязan Region. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2011, iss. 4, pp. 44–55. (In Russ.).
14. Реймерс Н.Ф. Птицы и млекопитающие южной тайги Средней Сибири. М.; Л.: Наука, 1966. 420 с.
Reymers N.F. *Birds and Mammals of Middle Siberia Southern Taiga*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 420 p. (In Russ.).
15. Самсонова В.П., Благовецкий Ю.Н., Кондрашкина М.И. Учет и картографирование сорной растительности. М.: Дашков и К°, 2006. 88 с.
Samsonova V.P., Blagoveshchenskiy Yu.N., Kondrashkina M.I. *Recording and Mapping of Weed Vegetation*. Moscow, Dashkov i K° Publ., 2006. 88 p. (In Russ.).
16. Третьякова А.С. Биоэкологическая характеристика сеgetальной флоры Среднего Урала // Экология. 2006. № 2. С. 110–115.
Tret'yakova A.S. Bioecological Characteristics of Segetal Flora of the Middle Urals. *Ekologia = Russian Journal of Ecology*, 2006, no. 2, pp. 110–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1067413606020056>
17. Уланова Н.Г. Восстановительная динамика растительности сплошных выруб и массовых ветровалов в ельниках южной тайги (на примере европейской части России): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2006. 46 с.
Ulanova N.G. *Restorative Dynamics of Vegetation in Clear-Cut Areas and Massive Windthrows in the Southern Taiga Spruce Forests (Case Study of the European Part of Russia)*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2006. 46 p. (In Russ.).
18. Уланова Н.Г. Механизмы сукцессий растительности сплошных выруб в ельниках южной тайги // Актуал. проблемы геоботаники. III Всерос. шк.-конф. Лекции. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 198–211.
Ulanova N.G. Mechanisms of Vegetation Successions in Clear-Cut Areas in the Southern Taiga Spruce Forests. *Current Issues of Geobotany. The III All-Russian School-Conference. Lectures*. Petrozavodsk, KarSC RAS Publ., 2007, pp. 198–211. (In Russ.).
19. Шмидт В.М. Флора Архангельской области. СПб.: СПбГУ, 2005. 346 с.
Schmidt V.M. *Flora of the Arkhangelsk Region*. Saint Petersburg, SPbU Publ., 2005. 346 p. (In Russ.).
20. Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. *Ecology. Individuals, Populations and Communities*. Oxford, Blackwell Science Ltd, 1996. 970 p.
21. Braun-Blanquet J. *Pflanzensoziologie*. Wien, Springer-Verlag, 1964. 865 p. (In Ger.). <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>
22. Grime J.P. *Plant Strategies and Vegetation Processes, and Ecosystem Properties*. Chichester, John Wiley & Sons, 2001. 417 p.
23. Kimmins J.P. *Forest Ecology: A Foundation for Sustainable Forest Management and Environmental Ethics in Forestry*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2004. 701 p.
24. Palmer M.W. Variation in Species Richness: Towards a Unification of Hypotheses. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*, 1994, vol. 29, iss. 4, pp. 511–530. <https://doi.org/10.1007/BF02883148>
25. Raunkiaer C. *The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography*. London, Oxford University Press, 1934. 632 p.

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

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

Научная статья

УДК 582.475.7.016

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-107-116

Функциональная характеристика хвои подроста ели сибирской под пологом и на вырубке ельника черничного в подзоне средней тайги

В.В. Тужилкина, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [P-9774-2015](https://orcid.org/0000-0002-4415-6598),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4415-6598>

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167982; tuzhilkina@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 19.01.21 / Одобрена после рецензирования 28.04.21 / Принята к печати 30.04.21

Аннотация. Сохранение хвойного подроста на вырубках таежной зоны имеет большое значение для ускоренного восстановления хвойных лесов. При оценке естественного возобновления леса на сплошных вырубках Севера важно знать основные процессы жизнедеятельности подроста, сохранившегося после рубки. Нами предпринята попытка рассмотреть эти вопросы с физиологических позиций. Изучены пигментная деятельность и углекислотный газообмен хвои елового подроста, обусловленные промышленными рубками в подзоне средней тайги Республики Коми. Выполнен сравнительный анализ физиологических показателей фотосинтетического аппарата 20-летнего подроста ели под пологом ельника черничного и на 8–10-летней вырубке после сплошнолесосечной рубки древостоя. Выявлены изменения пигментного фонда подроста в связи с проведением рубки ельника. В ельнике черничном влажном хвоя подроста ели накапливает хлорофиллов и каротиноидов 1,08–1,63 и 0,26–0,37 мг/г сухой массы соответственно. На вырубке в хвое подроста ели концентрация зеленых пигментов на 18–25 %, желтых – на 18–35 % больше, чем у подроста под пологом. Фотосинтетический аппарат подроста на вырубке приспосабливается к условиям среды на уровне пигментной системы путем активизации синтеза хлорофиллов и каротиноидов. Сезонный ритм содержания пигментов у елового подроста на вырубке и под пологом в ельнике черничном одинаковый. Наибольшее количество пигментов отмечалось осенью, что является приспособительным признаком, который наряду с другими механизмами обеспечивает устойчивость ассимиляционного аппарата к условиям Севера. Фотосинтетическая способность хвои (2,69 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) у подроста ели на вырубке в 1,5 раза выше по сравнению с активностью фотосинтеза хвои в ельнике черничном, что способствует накоплению ассимилятов и их использованию в ростовых процессах. Хвоя елового подроста на вырубке свойственна низкая дыхательная способность (0,20 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), которая ведет к улучшению баланса углерода. Полученные данные обеспечивают основу для моделирования поведения естественного возобновления лесов и могут быть использованы для решения вопросов улучшения функционирования ельников при их интенсивной эксплуатации в Республике Коми.

Ключевые слова: Север, средняя тайга, сплошнолесосечная рубка, вырубка, ельник, ельник черничный, подрост ели сибирской, хвоя, пигменты, CO_2 -газообмен, Республика Коми
Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Института биологии Коми НЦ УрО РАН (номер госрегистрации 1021051101417-8-1.6.19).

Для цитирования: Тужилкина В.В. Функциональная характеристика хвои подроста ели сибирской под пологом и на вырубке ельника черничного в подзоне средней тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 107–116. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-107-116>

Original article

Functional Characteristics of Siberian Spruce Undergrowth Needles under the Canopy and in the Cutting of Bilberry Spruce Forest in the Middle Taiga Subzone

Valentina V. Tuzhilkina, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: P-9774-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4415-6598>

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, Komi Republic, Syktyvkar, 167982, Russian Federation; tuzhilkina@ib.komisc.ru

Received on January 19, 2021 / Approved after reviewing on April 28, 2021 / Accepted on April 30, 2021

Abstract. Currently, the coniferous undergrowth preservation in the cuttings of the boreal zone is of great importance for the accelerated restoration of coniferous forests. When assessing the natural regeneration of forests in clear cuttings of the North, it is important to know the basic life activity processes of the undergrowth that survived after logging. An attempt to consider these issues from a physiological point of view has been made. The pigment activity and carbon dioxide gas exchange of spruce undergrowth needles caused by industrial logging in the middle taiga subzone of the Komi Republic was studied. This article provides a comparative analysis of the photosynthetic apparatus physiological parameters of the 20-year-old spruce undergrowth under the canopy of the bilberry spruce forest and in the 8-10-year-old clear cutting. Changes in the undergrowth pigment pool due to spruce forest felling were revealed. In a damp spruce bilberry forest, the spruce undergrowth needles accumulate chlorophylls and carotenoids; 1.08–1.63 and 0.26–0.37 mg/g of dry weight, respectively. The concentration of green and yellow pigments in the spruce undergrowth needles is 18–25 and 18–35 % higher in the clear cutting than under the canopy. The undergrowth photosynthetic apparatus in the clear cutting adapts to environmental conditions at the pigment system level by activating the synthesis of chlorophylls and carotenoids. The seasonal rhythm of pigment content was the same in the spruce undergrowth in the clear cuttings and under the canopy of the bilberry spruce forest. The greatest amount of pigments was observed in autumn, which is an adaptive trait that ensures the resistance of the assimilation apparatus to the Northern conditions along with other mechanisms. We have found that the photosynthetic capacity ($2.69 \mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) of the spruce undergrowth needles in the cutting is 1.5 times higher than in the bilberry spruce forest, which contributes to the assimilates accumulation and their use in growth processes. The spruce undergrowth needles in the cutting have a low respiratory capacity ($0.20 \mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), which leads to an improved carbon balance. The obtained data provide the basis for modeling the behavior of natural regeneration of forests and can be used to address issues of improving the functioning of spruce forests during their intensive operation in the Komi Republic.

Keywords: North, middle taiga, clear cutting, cutting, spruce forest, bilberry spruce forest, Siberian spruce undergrowth, needles, pigments, CO_2 gas exchange, Komi Republic

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration No. 1021051101417-8-1.6.19).



For citation: Tuzhilkina V.V. Functional Characteristics of Siberian Spruce Undergrowth Needles under the Canopy and in the Cutting of Bilberry Spruce Forest in the Middle Taiga Subzone. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 107–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-107-116>

Введение

На Европейском Севере России на протяжении всей истории развития лесной промышленности еловые леса были одним из основных объектов лесопользования. В связи с этим для Республики Коми – региона, где сосредоточены основные площади эксплуатационных насаждений, – в число главных задач лесного хозяйства по-прежнему входит лесовосстановление. В настоящее время сохранение подроста на вырубках таежной зоны имеет большое значение для ускоренного восстановления хвойных лесов [1]. Естественное возобновление леса на вырубках является преобладающим в Республике. На 55–65 % площади вырубок европейского Северо-Востока оно осуществляется за счет сохранения подроста хвойных пород [9].

В лесных сообществах после рубки существенно изменяются экологические условия среды, физико-химические свойства почв, запасы органического вещества и углерода [2, 11, 13, 26]. Подрост, образовавшийся под пологом древостоя, после рубки оказывается в иных условиях существования. Поэтому для оценки состояния такого подроста, его жизнеспособности и отдельных аспектов механизма функционирования, ответственных за продуктивность хвойных лесов, необходимы исследования физиологических процессов подроста, связанных с условиями среды.

Есть публикации, посвященные изучению влияния экологических условий на жизнеспособность подроста ели, сосны и кедра под пологом древостоев разных типов леса и на вырубках [5, 10, 14]. В последнее время ученые все чаще обращаются к более подробному изучению ответных физиологических реакций ассимиляционного аппарата подроста ели и сосны на изменение условий среды, связанное с проведением рубок ухода во вторичных сообществах [3, 4, 6]. Вместе с тем недостаточно изучен характер изменений фотосинтетической активности подроста хвойных в процессе приспособления их к новым экологическим условиям на вырубках Севера. Перспективность этого направления исследований в последнее время определяется также изменением баланса углерода в экосистемах вырубок.

Цель работы – сравнительная оценка пигментного фонда, фотосинтетической и дыхательной способности хвои у подроста ели сибирской под пологом древостоя и на вырубке.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в 2013 и 2016 гг. на территории расположенного в подзоне средней тайги Чернамского (62° 00' с. ш. и 50° 20' в. д.) лесоэкологического стационара Института биологии Коми научного центра УрО РАН. Работа выполнена на постоянной пробной площади, заложенной в 1978 г. в ельнике черничном влажном: состав – 7Е2Б1С, разновозрастный (70–210 лет), средний диаметр ели колеблется от 16 до 22 см, средняя высота – от 14 до 19 м, IV класс

бонитета [7]. Подрост (1,6 тыс. экз./га) представлен в основном елью. Почва торфянисто-подзолисто-глеяватая иллювиально-гумусово-железистая. В зимний период 2005–2006 гг. в еловом фитоценозе на площади 500 га проведена сплошно-лесосечная рубка с хлыстовой трелевкой древесины. По данным, полученным в 2019 г. Н.В. Лихановой и К.С. Бобковой [11], на 4–5-летней вырубке идет восстановление древесных растений, состав самосева и подроста (8315 экз./га) – 6ЕЗБ1Р6+ед.Ос.

Объект исследования – подрост ели, высотой около 1,0 м, возрастом 25 лет, произрастающий под пологом древостоя ельника черничного и на 8–10-летней вырубке. В экспериментах использовали однолетнюю хвою ели. Для изучения динамики пигментов в течение вегетации отбирали образцы хвои с 10 деревьев подроста. Такая биологическая повторность считается достаточной для достоверной характеристики биохимического состава хвои [25]. Побеги срезали с середины кроны с южной стороны. Измерения CO_2 -газообмена хвои проводили на интактных побегах елового подроста в июле.

Количественный анализ фотосинтетических пигментов осуществляли спектрофотометрически на приборе UV-1800 (Shimadzu, Япония) в ацетоновой вытяжке по оптической плотности при длинах волн 662 и 644 нм для хлорофиллов и 470 нм для каротиноидов с поправками в максимумах поглощения. Содержание хлорофилла в светособирающем комплексе оценивали по соотношению хлорофилла *a* и *b* [28].

Фотосинтетическую способность определяли по поглощению CO_2 , определенному инфракрасным газоанализатором LiCOR-6400 (LiCOR, США) при насыщающей освещенности и температуре 20–22 °С. Дыхание измеряли ИК-газоанализатором в темноте при 20–22 °С по выделению CO_2 . Фотосинтетическую активность и дыхательную способность хвои оценивали посредством контролируемой камеры 6400-22L (LiCOR, США).

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программ Excel и Statistica. Значимость отличий исследуемых показателей от контроля проверяли с помощью критерия Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

Пигменты. Состав, содержание и состояние пигментов в листьях древесных растений являются важными показателями функционирования фотосинтетического аппарата. Содержание хлорофиллов и каротиноидов в ассимилирующих органах часто используется в качестве физиологического показателя, определяющего потенциальную продуктивность, реакцию и адаптационную способность растений к изменяющимся условиям окружающей среды, а также фотосинтетическое связывание атмосферного углерода растительными сообществами [3, 12, 15–19, 21, 23].

Полученные данные по динамике содержания и соотношения фотосинтетических пигментов в хвое ели у подроста позволили выявить различия этого показателя в зависимости от условий произрастания. В ельнике черничном влажном хвоя подроста ели накапливает хлорофиллов и каротиноидов 1,08–1,63 и 0,26–0,37 мг/г сухой массы соответственно (табл. 1).

Таблица 1

**Содержание пигментов в хвое подроста ели на вырубке и под пологом
ельника черничного, мг/г сухой массы**
**The content of pigments in the spruce undergrowth needles in the cutting
and under the canopy of bilberry spruce forest, mg/g dry weight**

Сезон	Вырубка				Ельник черничный влажный			
	хлорофилл <i>a + b</i>	каротиноиды	хлорофилл <i>a/b</i>	хлорофилл / каротиноиды	хлорофилл <i>a + b</i>	каротиноиды	хлорофилл <i>a /b</i>	хлорофилл / каротиноиды
Весна	1,21±0,06	0,39±0,02	3,4	3,1	1,29±0,13	0,35±0,02	2,5	3,6
Лето	1,49±0,02*	0,37±0,01*	2,5	4,0	1,08±0,11	0,26±0,03	3,2	4,2
Осень	1,99±0,10*	0,45±0,02*	2,4	4,4	1,63±0,12	0,37±0,03	2,2	3,3

*Содержание пигментов в хвое ели на вырубке достоверно отличается от их содержания в хвое ели под пологом при уровнях значимости $P \leq 0,05$ и $P \leq 0,01$ летом и осенью соответственно.

На вырубке в однолетней хвое подроста ели содержание зеленых пигментов на 18–25 %, желтых – на 18–35 % выше, чем у подроста под пологом. Вероятно, повышенное содержание пигментов в хвое у елового подроста на 8–10-летней вырубке обусловлено как физиологическим состоянием, так и факторами среды, которые изменились после рубки древостоя. Это свидетельствует о способности пигментной системы адаптироваться к новым экологическим условиям.

Изменения в пигментном комплексе подроста на вырубке происходят за счет динамики обеих форм хлорофилла. Летом концентрация хлорофиллов в хвое у подроста на вырубке увеличивается, а под пологом леса уменьшается. Их наибольшее количество накапливается в конце вегетации, что согласуется с данными, полученными ранее для взрослых деревьев [8, 17, 29]. Подрост ели на вырубке и ель, произрастающая под пологом в ельнике черничном, почти не отличались по соотношению хлорофиллов *a/b* и количеству пигментов в светособирающем комплексе. Доля хлорофилла в светособирающем комплексе хвои у подроста ели на вырубке составляла 50–66 %, а у подпологовой ели – 54–68 % от общего фонда зеленых пигментов. Отсюда следует вывод об одинаковых светопоглощающих свойствах хвои. Расчет ассимиляционных чисел показал, что хвоя елового подроста в годы исследования имела различную фотосинтетическую активность единицы хлорофилла. Летом ассимиляционные числа у хвои ели под пологом древостоя были в пределах 4,1–4,9 (мг $\text{CO}_2 \cdot \text{г}$ сухой массы) /мг хлорофилла в час, что в 1,1–1,3 раза выше, чем у хвои подроста на вырубке. То есть у елового подроста на вырубке в поглощении единицы CO_2 участвовало большее количество хлорофилла.

Характер сезонной динамики каротиноидов, в отличие от хлорофиллов, у подроста на вырубке и под пологом в ельнике идентичен. Количество хлорофиллов подвержено сравнительно небольшим колебаниям в течение вегетации. В осенний период наблюдалась тенденция увеличения концентрации желтых пигментов, выполняющих, наряду с фотосинтетической функцией, протекторную [24, 27]. Повышенное количество хлорофиллов и каротиноидов в этот период является приспособительным признаком, который вместе с другими защитными механизмами обеспечивает устойчивость ассимиляционного аппарата ели

к условиям Севера [17]. Осенью у подростка ели на вырубке отношение хлорофиллов к каротиноидам в 2 раза выше по сравнению с подпологовой елью, что свидетельствует об уменьшении доли каротиноидов в общем фонде фотосинтетических пигментов. Таким образом, пластидный аппарат подростка ели приспособлялся к условиям среды на вырубке путем изменения количества фотосинтетических пигментов: увеличения содержания как хлорофиллов, так и каротиноидов.

Следует отметить, что особенности формирования пигментного фонда ассимиляционного аппарата в значительной степени определяют специфику газообмена хвои елового подростка.

Углекислотный газообмен. Измерения CO_2 -газообмена хвои ели, проведенные при температуре 20–22 °С и насыщенной интенсивности света, показали, что максимальная скорость фотосинтеза у подростка на вырубке почти в 1,5 раза выше, чем под пологом древостоя (табл. 2).

Таблица 2

**CO_2 -газообмен однолетней хвои у подростка ели, мкмоль $\text{CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$
 CO_2 gas exchange of annual needles in spruce undergrowth, $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$**

Показатель	Вырубка	Ельник черничный
Скорость видимого фотосинтеза: при фотосинтетически активной радиации (300 мкмоль/ $(\text{m}^2 \cdot \text{c})$)	1,63±0,15*	1,18±0,09
максимальная	2,69±0,06**	1,90±0,13
Скорость темнового выделения CO_2	0,20±0,08**	0,68±0,12

* Фотосинтез хвои ели на вырубке достоверно отличается от фотосинтеза хвои ели под пологом при уровне значимости $P \leq 0,05$. ** Фотосинтез и дыхание хвои ели на вырубке достоверно отличаются от фотосинтеза и дыхания хвои ели под пологом при уровне значимости $P \leq 0,01$.

Летом при более благоприятных для ели температурных (20 °С) и световых условиях (фотосинтетически активная радиация – 300 мкмоль/ $(\text{m}^2 \cdot \text{c})$), характерных для погоды с переменной облачностью, хвоя поглощала CO_2 со скоростью 1,63 и 1,18 мкмоль/ $(\text{m}^2 \cdot \text{c})$ на вырубке и в ельнике черничном соответственно. Увеличение усвоения углекислоты подростом на вырубке в значительной степени обусловлено накоплением хлорофилла в пластидах (см. табл. 1). Следует отметить, что после рубки материнского древостоя изменяются условия освещения, которые влияют на физиологические процессы растений. Как установили А.Р. Чистяков, Т.А. Леухина, Е.И. Успенский [22], степень изменения световых условий после рубки материнского полога неодинакова для подростка разных категорий жизнеспособности. Создающаяся неравномерность освещения под пологом леса снижает эффективность работы фотосинтетического аппарата подпологовых растений [20]. Повышенная интенсивность фотосинтеза хвои у подростка ели после рубки древостоя отмечалась ранее другими исследователями [4, 5, 10, 22].

Скорость темнового дыхания хвои у елового подростка в ельнике черничном в 3,5 раза выше, чем на вырубке, и составляет 35,8 % от максимальной видимой интенсивности фотосинтеза. На вырубке при дыхании хвои подростка при благоприятных условиях среды окисляется лишь 7,4 % ассимилированного в процессе фотосинтеза углерода.

Заключение

В условиях средней тайги успешность восстановления еловых древостоев на вырубках после сплошнолесосечных рубок в значительной степени зависит от сохранения, состояния и адаптации подроста на вырубке. Выявлено, что у елового подроста на 8–10-летней вырубке происходит функциональная перестройка пигментного аппарата. Хвоя приспосабливается к условиям среды на уровне пигментной системы путем активизации синтеза хлорофиллов и каротиноидов.

Хвоя у подроста ели на вырубке может поглощать CO_2 с довольно высокой скоростью – до $5,6 \text{ мг CO}_2 / \text{г сухой массы в час}$, или $2,5 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Это способствует накоплению в хвое ассимилятов и использованию их в процессе роста. Усиление фотосинтетической деятельности хвои подроста ели после рубки древостоя свидетельствует о перестройке обменных процессов под действием условий существования на вырубке.

Таким образом, изменение экологических условий в ельнике черничном после сплошнолесосечной рубки древостоя приводит к усилению синтеза пигментов хвои у сохранившегося подроста ели, что положительно сказывается на усвоении углекислоты в хлоропластах и способствует активизации фотосинтетической деятельности хвои, а в итоге увеличению продуктивности подроста ели на вырубке. В целом функциональная организация хвои обеспечивает успешный рост елового подроста на вырубках в подзоне средней тайги Республики Коми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (На примере ельников Северо-Запада России). СПб.: СПбГЛТА, 2001. 185 с.
Gryazkin A.V. *Regeneration Potential of Taiga Forests (Case Study of Spruce Forests of Northwest Russia)*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2001. 185 p. (In Russ.).
2. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798.
Dymov A.A. The Impact of Clearcutting in Boreal Forests of Russia on Soils: A Review. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2017, no. 7, pp. 787–798. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070024>
3. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Динамика накопления пластидных пигментов у подроста ели при онтогенезе березняка черничного // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 3. С. 54–64.
Zarubina L.V., Konovalov V.N. Accumulation Dynamics of Plastid Pigments in Spruce Undergrowth in Ontogenesis of the Bilberry Birch Forest. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 3, pp. 54–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.3.54>
4. Катрушенко И.В. Фотосинтез подроста ели во вторичных сообществах южной тайги // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса. М.: Наука, 1967. С. 237–242.
Katrushenko I.V. Photosynthesis of Spruce Undergrowth in secondary Communities of the Southern Taiga. *Light Regime and Forest Productivity*. Moscow, Nauka Publ., 1967, pp. 237–242. (In Russ.).

5. Комиссаров Д.А., Штейнвольф Л.П. Интенсивность фотосинтеза подроста ели в разных экологических условиях // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса. М.: Наука, 1967. С. 243–254.

Komissarov D.A., Steinwolf L.P. Intensity of Spruce Undergrowth Photosynthesis in Different Ecological Conditions. *Light Regime and Forest Productivity*. Moscow, Nauka Publ., 1967, pp. 243–254. (In Russ.).

6. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Отток и распределение ^{14}C -ассимилятов у ели при выборочных рубках в северотаежных фитоценозах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 40–55.

Kononov V.N., Zarubina L.V. Outflow and Distribution of Spruce ^{14}C -Assimilates after Selective Felling in the Northern Taiga Phytocenosis. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 2, pp. 40–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.40>

7. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции / отв. ред. К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. 337 с.

Virgin Spruce Forest on North: Biodiversity, Structure, Functions. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Moscow, Nauka Publ., 2006. 337 p. (In Russ.).

8. Ладанова Н.В., Тужилкина В.В. Структурная организация и фотосинтетическая активность хвои ели сибирской. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1992. 96 с.

Ladanova N.V., Tuzhilkina V.V. *Structural Organization and Photosynthetic Activity of Siberian Spruce Needles*. Syktyvkar, Komi NTs UrO RAN Publ., 1992. 96 p. (In Russ.).

9. Ларин В.Б., Паутов Ю.А. Формирование хвойных молодняков на вырубках северо-востока европейской части СССР. Л.: Наука, 1989. 144 с.

Larin V.B., Pautov Yu.A. *Formation of Coniferous Young Growth in the Cuttings of the North-East of the European Part of the USSR*. Leningrad, Nauka Publ., 1989. 144 p. (In Russ.).

10. Леина Г.Д. Фотосинтез елового подроста под пологом и на вырубках ельника черничника свежего в связи с давностью рубки // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса. М.: Наука, 1967. С. 232–236.

Leina G.D. Photosynthesis of Spruce Undergrowth under the Canopy and in the Cuttings of Young Bilberry Spruce Forest in Relation to the Cutting Age. *Light Regime and Forest Productivity*. Moscow, Nauka Publ., 1967, pp. 232–236. (In Russ.).

11. Лиханова Н.В., Бобкова К.С. Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников средней тайги Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 91–100.

Likhanova N.V., Bobkova K.S. Pools and Carbon Fluxes in Felling Ecosystems Spruce Forests of the Middle Taiga of the Komi Republic. *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 2, pp. 91–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-091-100>

12. Мартынюк З.П., Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Оценка баланса углерода лесного фитоценоза // Физиология растений. 1998. Т. 45, № 6. С. 914–918.

Martynyuk Z.P., Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Estimation of Carbon Balance of Forest Phytocenosis. *Fiziologiya rastenij = Russian Journal of Plant Physiology*, 1998, vol. 45, no. 6, pp. 914–918. (In Russ.).

13. Осипов А.Ф., Тужилкина В.В., Дымов А.А., Бобкова К.С. Запасы фитомассы и органического углерода среднетаежных ельников при восстановлении после сплошно-лесосечной рубки // Изв. РАН. Сер.: Биологическая. 2019. № 2. С. 215–224.

Osipov A.F., Tuzhilkina V.V., Dymov A.A., Bobkova K.S. Phytomass and Organic Carbon Stocks in the Middle Taiga Spruce Forests during Restoration after Clear Cutting. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*, 2019, no. 2, pp. 215–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0002332919020103>

14. Судачкова Н.Е., Расторгуева Е.А., Коловский Р.А. Физиология подростка кедр: исследования в кедровнике Западного Саяна. М.: Наука, 1967. 122 с.

Sudachkova N.E., Rastorgueva E.A., Kozlovsky R.A. *Physiology of Cedar Undergrowth: Studies in a Cedar Forest of the Western Sayan*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 122 p. (In Russ.).

15. Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Коновалов В.Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения: диагностика состояния. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 332 с.

Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Konovalov V.N. *Forest Ecosystems of the Northern Dvina Basin in Conditions of Atmospheric Pollution: State Diagnosis*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2004. 332 p. (In Russ.).

16. Тарчевский И.А., Андрианова Ю.Е. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы // Физиология растений. 1980. Т. 27, № 2. С. 341–347.

Tarchevskiy I.A., Andrianova I.A. The Content of Pigments as an Indicator of Capacity of Photosynthetic Apparatus Development in Wheat. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 1980, vol. 27, no. 2, pp. 341–347. (In Russ.).

17. Тужилкина В.В. Фотосинтетические пигменты хвои ели сибирской в среднеэтажных лесах европейского Северо-Востока России // Сиб. лесн. журн. 2017. № 1. С. 65–73.

Tuzhilkina V.V. Photosynthetic Pigments of the Siberian Spruce Needles in the Middle Taiga Forests of the European North-East Russia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2017, no. 1, pp. 65–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/sjfs20170107>

18. Тужилкина В.В., Бобкова К.С., Мартынюк З.П. Хлорофилльный индекс и фотосинтетический сток углерода в хвойные фитоценозы на Европейском Севере России // Физиология растений. 1998. Т. 45, № 4. С. 594–600.

Tuzhilkina V.V., Bobkova K.S., Martynyuk Z.P. Chlorophyll Index and Annual Photosynthetic Deposition of Carbon in Coniferous Phytocenoses in the European North of Russia. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 1998, vol. 45, no. 4, pp. 594–600. (In Russ.).

19. Тужилкина В.В., Плюснина С.Н. Структурно-функциональные изменения хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения // Лесоведение. 2020. № 6. С. 537–547.

Tuzhilkina V.V., Plyusnina S.N. Structural and Functional Alterations of Pine Needles under the Conditions of Airborne Technogenic Pollution. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2020, no. 6, pp. 537–547. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114820060091>

20. Цельникер Ю.Л., Князева И.Ф. Пульсация интенсивности света в лесу как фактор воздействия на фотосинтез подростка // Лесоведение. 1973. № 3. С. 60–63.

Tzel'niker Yu.L., Knyazeva I.F. Light Intensity Pulsation in the Forest as a Factor of Influence on Undergrowth Photosynthesis. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1973, no. 3, pp. 60–63. (In Russ.).

21. Цельникер Ю.Л., Малкина И.С. Хлорофилльный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41, № 3. С. 325–330.

Tzel'niker Yu.L., Malkina, I.S. Chlorophyll Index as a Characteristic of Annual Accumulation of Carbon in Forest Stands. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 1994, vol. 41, no. 3, pp. 325–330. (In Russ.).

22. Чистяков А.Р., Леухина Т.А., Успенский Е.И. Физиологическое состояние елового подростка разных категорий жизнеспособности // Изв. вузов. Лесн. журн. 1968. № 1. С. 10–12. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1968/201968.pdf>

Chistyakov A.R., Leukhina T.A., Uspenskiy E.I. Physiological State of Spruce Undergrowth of Different Viability Categories. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1968, no. 1, pp. 10–12. (In Russ.).

23. Bačič T., Ledič A. Changes of Pigments Content in Needles of *Pinus halepensis* Mill. *Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica*, 1993, vol. 34, pp. 71–76.

24. Demmig-Adams B., Adams W.W. Photoprotection and Other Responses of Plants to High Light Stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1992, vol. 43, pp. 599–626. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.43.060192.003123>

25. Helmisaari H.-S. Spatial and Age-Related Variation in Nutrient Concentration of *Pinus sylvestris* Needles. *Silva Fennica*, 1992, vol. 26, no. 3, pp. 145–153. <https://doi.org/10.14214/sf.a15643>

26. Holtsmark B. Harvesting in Boreal Forests and the Biofuel Carbon Debt. *Climatic Change*, 2012, vol. 112, iss. 2, pp. 415–428. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0222-6>

27. Krinsky N.I. Carotenoid Protection against Oxidation. *Pure and Applied Chemistry*, 1979, vol. 51, pp. 649–660. <https://doi.org/10.1351/pac197951030649>

28. Lichtenthaler N.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*, 1987, vol. 148, pp. 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

29. Ottander C., Campbell D., Öquist G. Seasonal Changes in Photosystem II Organisation and Pigment Composition in *Pinus sylvestris*. *Planta*, 1995, vol. 197, pp. 176–183. <https://doi.org/10.1007/BF00239954>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 528.856:630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-117-125

Состояние лесных массивов на насыщенных оксидами железа почвах Азербайджана

Б.Г. Алиев, иностр. чл. РАН, акад., д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [CAJ-5455-2022](https://orcid.org/0000-0001-6129-3415),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6129-3415>

В.М. Мамедалиева[✉], *канд. геогр. наук, доц.;* *ResearcherID:* [AAC-5454-2021](https://orcid.org/0000-0002-8775-8564),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-8564>

Институт экологии Национального аэрокосмического агентства, ул. С.С. Ахундова, д. 1, г. Баку, Азербайджанская Республика, AZ1115; bahram_aliyev@hotmail.com, valide.mamedaliyeva@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 16.01.21 / Одобрена после рецензирования 18.04.21 / Принята к печати 22.04.21

Аннотация. В настоящее время в Азербайджане приоритет отдается развитию нефтегазового сектора. Активно развивается горнодобывающая промышленность, призванная стать одним из его локомотивов. Это наносит ущерб экологии региона. Одной из причин деградации лесов на западе страны стала интенсивная деятельность по добыче полезных ископаемых. Исследовано взаимовлияние состояния лесных массивов и наличия в почве минералов, содержащих оксиды железа, в регионе Малого Кавказа, который охватывает два промышленно развитых района Азербайджана – Дашкесанский и Кедабекский. По материалам спутниковых съемок за значительный период времени вычислены спектральные индексы растительности. Показан процесс обработки космических снимков, включающий их предварительную обработку, спектральный, геопространственный и корреляционный анализ для нахождения количественных коэффициентов связи доли оксидов железа в почве и состояния леса. Спектральный анализ позволяет определить состояние леса путем вычисления вегетационного индекса SPI, а также наличие в почвах региона минералов, содержащих оксиды железа, – через мультиспектральный индекс Ferric oxides. Геопространственный анализ предназначен для оценки состояния леса в местах залежей указанных минералов. Корреляционный анализ – для сравнения процессов деградации в исследованных районах. Приводятся электронные карты, составленные путем наложения карт состояния лесных массивов и карт содержания оксидов железа. Отмечается динамика, подтверждающая увеличение доли разрушенных лесов в районах исследований.

Ключевые слова: лесорастительный покров, горные леса, космические снимки, спектральные индексы, состояние леса, минералы, оксиды железа

Для цитирования: Алиев Б.Г., Мамедалиева В.М. Состояние лесных массивов на насыщенных оксидами железа почвах Азербайджана // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 117–125. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-117-125>

Original article

The State of Forests Growing on Iron Oxide-Saturated Soils of Azerbaijan

Bahram G. Aliyev, Foreign Member of RAS, Academician, Honored Scientist-Specialist in Land Reclamation, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [CAJ-5455-2022](https://orcid.org/0000-0001-6129-3415), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6129-3415>

Valida M. Mamedaliyeva[✉], Candidate of Geography; Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-5454-2021](https://orcid.org/0000-0002-8775-8564), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-8564>
Azerbaijan National Aerospace Agency, Institute of Ecology, S.S. Akhundov str., 1, Baku, AZ1115, Republic of Azerbaijan; bahram_aliyev@hotmail.com, valide.mamedaliyeva@mail.ru[✉]

Received on January 16, 2021 / Approved after reviewing on April 18, 2021 / Accepted on April 22, 2021

Abstract. Today Azerbaijan focuses on the non-oil sector development. The mining industry is actively growing, to become one of its driving forces. This is detrimental to the ecology of the region. The intensive mining activity has become one of the reasons for the mountain forests degradation in the West of the country. The article is devoted to the study of the mutual influence of the forests state and the presence of minerals containing iron oxides in the soil in the Lesser Caucasus region, which involves two industrially developed districts of Azerbaijan: Dashkesan and Gadabay. The study is based on the calculation of spectral indices of satellite imagery over a significant period of time. The paper shows the processing of satellite images, including their pretreatment, spectral, geospatial and correlation analysis aimed at finding quantitative coefficients of the relationship between the iron oxides fraction in the soil and the forest state. Spectral analysis allows determining the forest state by calculating the SIPI vegetation index, as well as the iron oxide minerals presence in the soils of the region by calculating the Ferric oxides multispectral index. Geospatial analysis is designed to assess the forest state in the areas of these mineral deposits. Correlation analysis is used to compare the degradation processes in the studied districts. There are electronic maps compiled by overlapping the forest state and the iron oxide content maps. There is a dynamics confirming an increase in the share of degraded forests in the areas of research.

Keywords: forest-vegetation cover, mountain forests, satellite images, spectral indices, forest state, minerals, iron oxide

For citation: Aliyev B.G., Mamedaliyeva V.M. The State of Forests Growing on Iron Oxide-Saturated Soils of Azerbaijan. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 117–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-117-125>

Введение

В настоящее время уменьшение площади лесных массивов является основной причиной утраты глобального биоразнообразия, выбросов углерода и изменения климата [11]. Особенно чувкими к негативным воздействиям являются горные леса. Их крайне сложно восстановить на склонах со значительными градиентами. При этом горные леса спасают местное население от стихийных бедствий, сохраняют природные ресурсы и гарантируют экологические услуги, которые дают миллиардам людей по всему миру опору для улучшения благосостояния и условий жизнедеятельности [4].



В Азербайджане вследствие несоблюдения правил рационального использования лесных массивов, из-за активно развивающейся горнодобывающей промышленности резко снижается водоохранно-почвозащитная способность растительности, что ведет к развитию эрозионных процессов, создает условия для возникновения селевых потоков [1].

Состояние лесов во многом зависит от свойств почвы, в частности от ее плодородия. На него оказывают влияние минералы в составе почвы. Одним из необходимых растительности минеральных элементов является железо. Железо входит в состав многих почвенных минеральных соединений. Нами рассмотрены минералы, содержащие оксиды железа. Это окислы и гидроокислы железа, а именно магнетит и гематит [7]. Присутствие оксидов железа в почве положительно сказывается на состоянии леса. Поэтому основной целью исследования стало сопоставить состояние лесного покрова и наличие в почве этого массива оксидов железа.

Часто проведение исследований на высокогорье затрудняется недоступностью многих участков. В этом случае наиболее эффективным становится применение методов дистанционного зондирования Земли из космоса с помощью спутников. Основной целью дистанционных наблюдений при лесопатологическом мониторинге является своевременное обнаружение опасных отклонений в санитарном состоянии лесов, а также предварительная оценка размеров повреждений [10].

Леса сталкиваются с многочисленными угрозами и стрессовыми факторами, среди которых можно выделить обезлесение, засуху, изменение климата, присутствие инвазивных видов, воздействие вредителей и патогенов, загрязнение воздуха, пожары, наводнения, ураганы, изменения в землепользовании или неустойчивое управление [15–18]. Определение болезней растительности путем наблюдения за эффектами на листьях растений делает процесс проще и дешевле. Использование методов машинного зрения позволяет проводить исследование состояния леса на основе изображений. Идентификация болезней растений визуальным путем становится все более актуальной задачей, но в то же время возможной только на ограниченных территориях [19].

Оценка лесопатологического состояния насаждений – отдельная специфическая задача в рамках лесоустройства. Наличие конкретных вредителей и болезней леса невозможно фиксировать непосредственно на аэро- и космических снимках. Однако последствия негативных влияний (повреждения лесного полога) определяются достаточно хорошо. В таких случаях основой дешифрирования являются характерные для ослабленных, поврежденных насаждений признаки: размер и форма кроны, цвет хвои или листьев и др. [2].

Объекты и методы исследования

Дашкесанский и Кедабекский районы находятся на западе Азербайджана, на средне- и высокогорье Малого Кавказа. Наибольшие высоты – 3300–3500 м над ур. м. Районы богаты полезными ископаемыми: здесь есть месторождения черного и белого мрамора, меди, золота, железной руды, кобальта, алунита, барита и др. В Дашкесанском районе находится одно из богатейших месторождений железных руд Южного Кавказа – Дашкесанское магнетитовое месторождение

[3, 5]. По данным сайта <https://www.mindat.org/>, на этом месторождении присутствует 26 различных минералов, из них 15 содержат железо [12]. Интенсивная промышленная деятельность нанесла значительный урон лесным массивам исследованных районов.

Характерным признаком растительности и показателем ее состояния является спектральная отражательная способность, различающаяся в зависимости от длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее отражательной способностью позволяют использовать космические мультиспектральные снимки для идентификации типов растительности и их состояния. В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются экспериментально исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв [8, 9].

В качестве исходных данных были использованы мультиспектральные снимки спутников Landsat 5 за 1987 и 1998 гг., а также Landsat 8 за 2015 и 2019 гг. Снимки Landsat 8/OLI позволяют демонстрировать высокую производительность при обнаружении оксидов железа, в том числе на территориях, покрытых лесной растительностью [13]. Предварительно с помощью программы ENVI проведена радиометрическая и атмосферная коррекция снимков [6]. Эта коррекция необходима для сравнения данных с сенсоров спутников, настроенных по-разному: полученные с них изображения без дополнительной радиометрической коррекции не подходят для тонкого спектрального анализа. Калибровочные коэффициенты и другие метаданные представляются в одном архивном файле с изображениями сцены в различных спектральных диапазонах.

Для всех откорректированных снимков было рассчитано значение структурно-нечувствительного пигментного индекса SIPI [20]. В отличие от нормализованного дифференциального вегетационного индекса NDVI, индекс SIPI используется для мониторинга состояния растений на территории с большой вариабельностью вегетационной структуры. SIPI определяет соотношение каротиноидов и хлорофилла: высокие значения могут свидетельствовать о болезни культур, часто приводящей к снижению количества хлорофильного пигмента в растительном покрове.

Таким образом, данный индекс характеризует состояние лесной растительности, уровень ее подверженности стрессу. Индекс был рассчитан по следующей формуле:

$$\text{SIPI} = (\text{NIR} - \text{BLUE}) / (\text{NIR} - \text{RED}), \quad (1)$$

где NIR – яркость изображения в ближнем инфракрасном канале; BLUE – яркость изображения в синем видимом канале; RED – яркость изображения в красном видимом канале.

Определение этого индекса позволяет выделить 3 класса лесных участков по состоянию: здоровые, поврежденные и разрушенные.

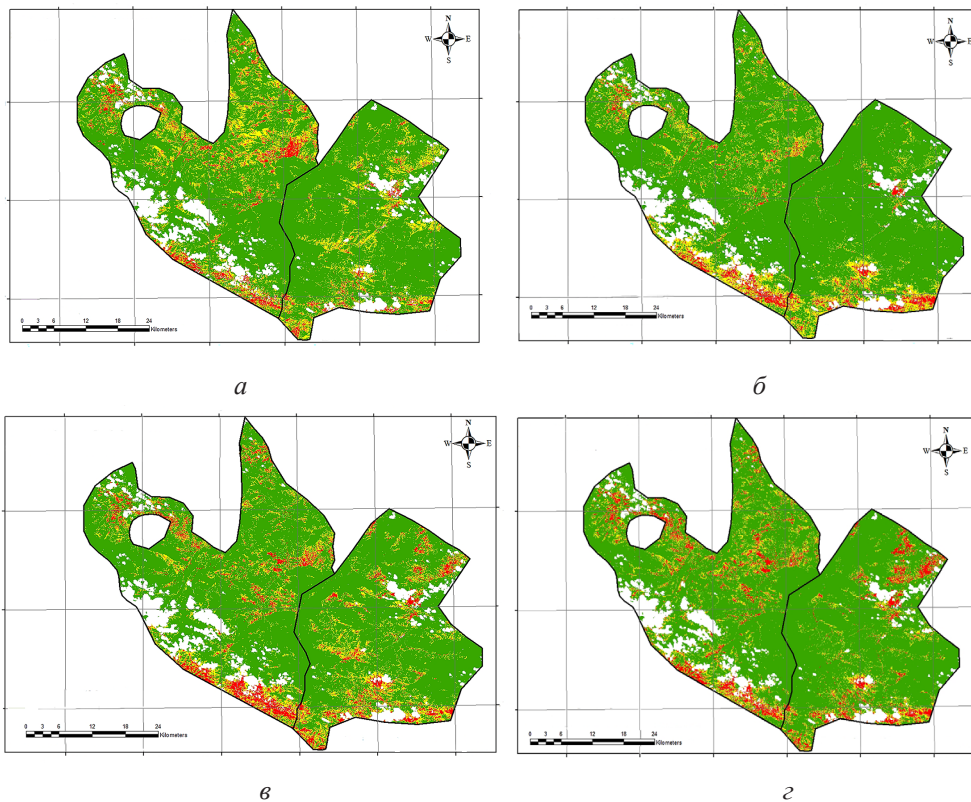
Содержание в почве оксидов железа можно найти с помощью спектрального индекса Ferric oxides, использующего соотношение коротковолнового (SWIR1) и ближнего инфракрасных каналов [14]:

$$\text{Ferric oxides} = \text{SWIR1} / \text{NIR}. \quad (2)$$

Сравнив карты, построенные на основе расчетов по формулам (1) и (2), можно определить площади содержащих оксиды железа почв, на которых находятся участки леса всех 3 классов.

Результаты исследования и их обсуждение

На 1-м этапе исследования по формуле (1) рассчитаны значения индекса SIPI для спутниковых снимков за все 4 года и лесной массив разделен на 3 класса. На рис. 1 показаны результаты обработки данных, полученных на 1-м этапе. В табл. 1 приведены площади лесного покрова 3 классов в разные годы.



■ — здоровый ■ — поврежденный ■ — разрушенный лесорастительный покров

Рис. 1. Разделение лесных массивов Дашкесанского и Кедабекского районов на классы по индексу SIPI: а – 1987; б – 1998; в – 2015; з – 2019 г.

Fig. 1. Division of the Dashkasan and Gadabay district forests into classes by the SIPI index: а – 1987; б – 1998; в – 2015; з – 2019

На 2-м этапе к использованным на 1-м этапе откорректированным изображениям было применено выражение (2) и построены карты почв с минералами, имеющими в составе оксиды железа (Ferric oxides) (рис. 2). Полученные численные данные показаны в табл. 2.

На 3-м этапе исследования проведено сравнение результатов 1-го и 2-го этапов, а именно карт залежей оксидов железа, а также карт разных классов лесорастительного покрова. Сравнение выполнено путем наложения карт для каждого года друг на друга. Результаты приведены на рис. 3.

Таблица 1

Площади, га, различных классов лесорастительного покрова в разные годы
Areas, ha, of forest-vegetation cover of different classes by years

Районы	Класс лесорастительного покрова	1987	1998	2015	2019	Динамика за 1987–2019 гг.
Дашкесанский и Кедабекский вместе	Здоровый	162 200	172 679	162 589	167 976	5776↑
	Поврежденный	33 653	25 514	29 503	22 865	10 788↓
	Разрушенный	10 238	8238	14 340	15 577	5339↑
Дашкесанский	Здоровый	77 792	80 869	73 603	78 731	939↑
	Поврежденный	12 888	9580	14 160	8624	4264↓
	Разрушенный	2715	3159	5860	6259	3544↑
Кедабекский	Здоровый	84 192	91 578	88 765	89 010	4818↑
	Поврежденный	20 695	15 873	15 293	14 199	6496↓
	Разрушенный	7498	5061	8440	9285	1787↑

Примечание: ↑ – рост; ↓ – снижение.

После наложения карт сформированы отдельные полигоны залежей оксидов железа на участках лесной растительности всех классов состояния и рассчитаны площади этих полигонов. Результаты сведены в табл. 3.

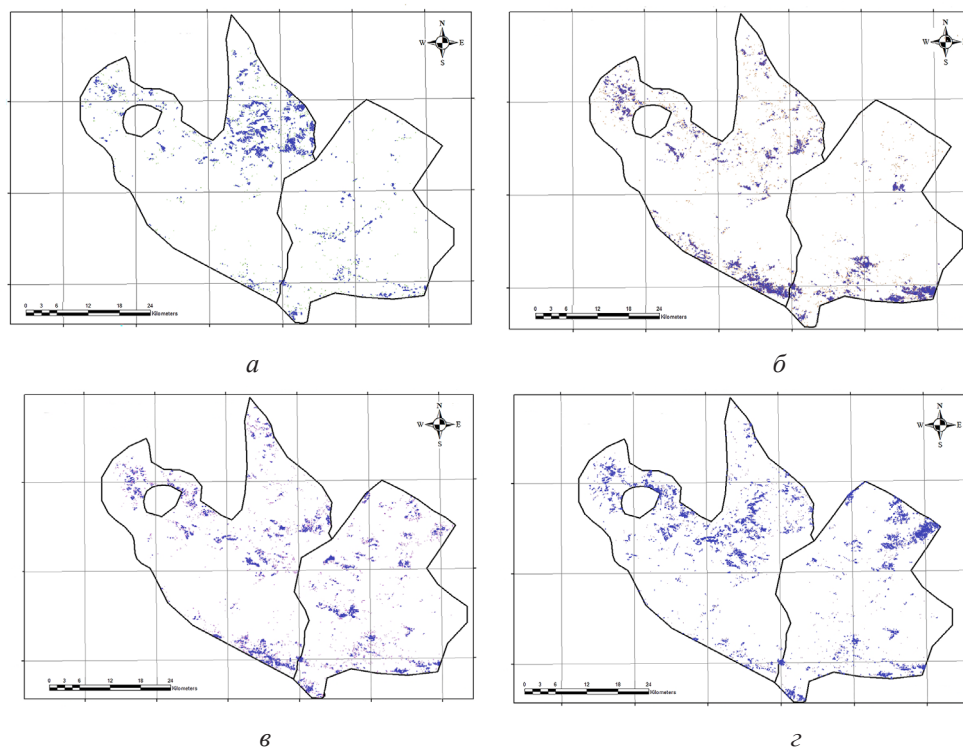


Рис. 2. Карта содержащих оксиды железа (■) почв Дашкесанского и Кедабекского районов: а – 1987; б – 1998; в – 2015; з – 2019 г.

Fig. 2. Map of soils containing iron oxides (■) of the Dashkesan and Kedabek districts by years: а – 1987; б – 1998; в – 2015; з – 2019

Таблица 2

Площади почв, га, содержащих оксиды железа, в разные годы
Areas, ha, of soils containing iron oxides by years

Районы	1987	1998	2015	2019	Динамика за 1987–2019 гг.
Дашкесанский и Кедабекский вместе	5055	8419	7250	7276	2221↑
Дашкесанский	926	3046	3133	2935	2009↑
Кедабекский	4129	5373	4117	4341	212↑

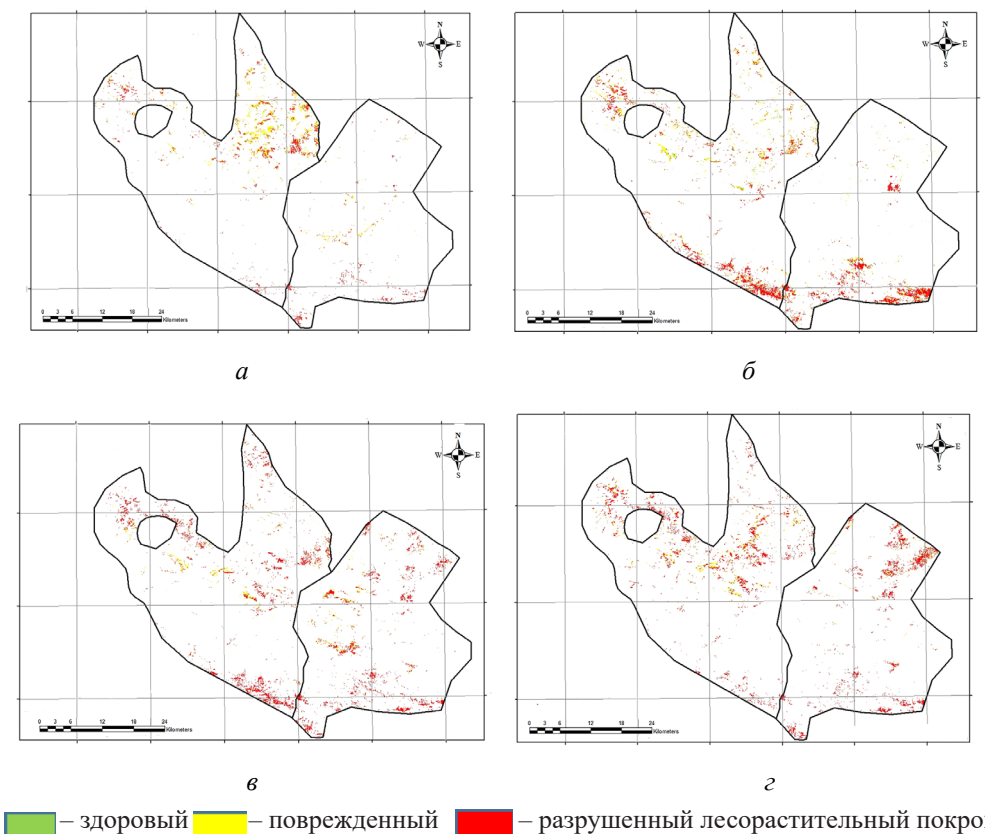


Рис. 3. Результаты наложения карт содержащих соединения оксидов железа залежей Дашкесанского и Кедабекского районов на карты индекса SIPI: *a* – 1987; *б* – 1998; *в* – 2015; *г* – 2019 г.

Fig. 3. Overlapping of the maps of deposits of the Dashkasan and Gadabay districts, containing iron oxide compounds, and the SIPI index maps by years: *a* – 1987; *б* – 1998; *в* – 2015; *г* – 2019

Найдена корреляция значений для каждого класса растительности Дашкесанского и Кедабекского районов. Корреляция рассчитывалась в программе Excel с помощью функции «Корреляция» в меню «Данные → Анализ данных». Были получены следующие значения: для здорового покрова – 0,02; для поврежденного покрова – 0,13; для разрушенного покрова – 0,99.

Таблица 3

Площади, га, залежей соединений оксидов железа на участках лесной растительности различных классов
Areas, ha, of deposits of iron oxide compounds on the forest vegetation sites of different classes

Районы	Класс лесорастительного покрова	1987	1998	2015	2019	Динамика за 1987–2019 гг.
Дашкесанский и Кедабекский вместе	Здоровый покров	37	85	14	42	5↑
	Поврежденный покров	2397	2807	1230	1407	990↓
	Разрушенный покров	2621	5527	6006	5827	3206↑
Дашкесанский	Здоровый покров	1	7	2	17	16↑
	Поврежденный покров	267	762	505	343	76↑
	Разрушенный покров	658	2277	2626	2575	1917↑
Кедабекский	Здоровый покров	36	78	12	25	11↓
	Поврежденный покров	2130	2045	725	1064	1066↓
	Разрушенный покров	1963	3250	3380	3252	1289↑

Заключение

Таким образом, оксиды железа в основном встречаются на участках поврежденного или разрушенного леса и частично на участках здоровой лесной растительности, то есть именно на тех участках, где велась интенсивная хозяйственная деятельность. С этим же связаны низкие значения корреляции между двумя районами для класса здоровой лесной растительности и высокие для класса разрушенной. В целом наблюдается незначительное увеличение количества участков со здоровым лесорастительным покровом и наличием минералов, содержащих оксиды железа, что говорит об их положительном влиянии на состояние лесной растительности на неповрежденных участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алиев Б.Г., Алиев И.Н. Проблемы эрозии в Азербайджане и пути ее решения. Баку: Нурлан, 2000. 122 с.
Aliyev B.G., Aliyev I.N. *Erosion Problems in Azerbaijan and Ways to Solve Them*. Baku, Nurlan Publ., 2000. 122 p. (In Russ.).
2. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Андреев Д.Н. Подготовка и применение материалов аэрофотосъемки для изучения лесов // Изв. Самар. НЦ РАН. 2016. Т. 18, № 2. С. 313–316.
Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Andreev D.N. Preparation and Applying of Aerial Photography for the Forest Studying. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 313–316. (In Russ.).
3. Все о геологии. Месторождение Дашкесан. Режим доступа: https://wiki.web.ru/wiki/Месторождение_Дашкесан (дата обращения: 31.10.22).
All about Geology. Dashkesan Deposit. (In Russ.).
4. Горные леса – основа нашего будущего/Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, ФАО. Отдел по оценке, рациональному использованию и сохранению лесов. Режим доступа: <http://caresd.net/img/docs/8517.pdf> (дата обращения: 31.10.22).
Mountain Forests are the Basis of Our Future. Division for Assessment, Rational Use and Conservation of Forests, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (In Russ.).

5. Дашкесан. Режим доступа: <https://portal.azertag.az/ru/node/2598> (дата обращения: 31.10.22).
Dashkesan. (In Russ.).
6. Колесникова О.Н., Черепанов А.С. Возможности ПК ENVI для обработки мультиспектральных и гиперспектральных данных // Геоматика. 2009. № 3. С. 24–27.
Kolesnikova O.N., Cherepanov A.S. New ENVI Software Opportunities for Processing Multispectral and Hiperpectral Data. *Geomatica*, 2009, no. 3, pp. 24–27. (In Russ.).
7. Химическая классификация минералов. Режим доступа: <https://bsu.by/faculties/ekspozitsii-muzeya/khimicheskaya-klassifikatsiya-mineralov.php> (дата обращения: 29.11.22).
Chemical Classification of Minerals. Belarusian State University. (In Russ.).
8. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
Cherepanov A.S. Vegetation Indices. *Geomatica*, 2011, no. 2, pp. 98–102. (In Russ.).
9. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral Properties of Vegetation and Vegetation Indices. *Geomatica*, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).
10. Чухланцев А.А., Саворский В.П. Задачи дистанционного зондирования лесов при изучении глобальных климатических изменений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 246–256.
Chukhlantsev A.A., Savorskiy V.P. Remote Sensing of Forests in Context of Global Change. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current problems in remote sensing of the Earth from space, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 246–256. (In Russ.).
11. Altamirano A., Aplin P., Miranda A., Cayuela L., Algar A.C., Field R. High Rates of Forest Loss and Turnover Obscured by Classical Landscape Measures. *Applied Geography*, 2013, vol. 40, pp. 199–211. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.03.003>
12. Dashkesan Co-Fe Deposit, Dashkesan, Dashkesan District, Azerbaijan. *Mindat*. Available at: <https://www.mindat.org/loc-2780.html> (accessed 22.04.21).
13. Ducart D., Silva A., Toledo C. et al. Mapping Iron Oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion Imagery from the Serra Norte Iron Deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 2016, vol. 46, no. 3, pp. 331–349. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160023>
14. Geology Indices Background. *L3Harris*. Available at: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/backgroundgeologyindices.html> (accessed 22.04.21).
15. Lausch A., Erasmi S., King D.J., Magdon P., Heurich M. Understanding Forest Health with Remote Sensing – Part I – A Review of Spectral Traits, Processes and Remote-Sensing Characteristics. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, iss. 12, art. 1029. <https://doi.org/10.3390/rs8121029>
16. Lewis S.L., Edwards D.P., Galbraith D. Increasing Human Dominance of Tropical Forests. *Science*, 2015, vol. 349, iss. 6250, pp. 827–832. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9932>
17. Mate A.R., Deshmukh R.R. Analysis of Effects of Air Pollution on Chlorophyll, Water, Carotenoid and Anthocyanin Content of Tree Leaves Using Spectral Indices. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 2016, vol. 6, no. 8, pp. 5465–5474.
18. Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., Jolly W.M., Piper S.C., Tucker C.J., Myneni R.B., Running S.W. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, vol. 300, iss. 5625, pp. 1560–1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>
19. Parashar S., Bhatia K., Bhadola S. Image Processing: A Methodology to Detect Plant Diseases. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2019, vol. 8, iss. 4, pp. 209–216.
20. Sergieieva K. Spectral Indices to Drive Digital Agri Solutions. *EOS Data Analytics*. Available at: <https://eos.com/blog/vegetation-indices/> (accessed 10.01.22).

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

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



Научная статья

УДК 630*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-126-138

Обоснование технологических параметров процесса трелевки древесины мини-трактором при проходных рубках

Э.Ф. Герц[✉], д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>

А.В. Мехренцев, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAE-5378-2020](https://orcid.org/0000-0002-2186-0152),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>

Н.Н. Теринов, д-р с.-х. наук; *ResearcherID*: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

А.Ф. Уразова, канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37,
г. Екатеринбург, Россия, 620100; gerz.e@mail.ru[✉], mehrentsev@yandex.ru,
n_n_terinov@mail.ru, ura-alina@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.21 / Одобрена после рецензирования 27.03.22 / Принята к печати 30.03.22

Аннотация. Рассмотрен метод перемещения мини-трактора при трелевке древесины, заготавливаемой в процессе проходной рубки. При этом анализировали не только горизонтальную структуру древостоя, сформировавшуюся в результате внутривидовой конкуренции, но и партнерские отношения образующих микрогруппы деревьев, расстояние между которыми меньше среднего расстояния между деревьями в древостое. Учтена структура и параметры наиболее характерных микрогрупп, формирующих древостои. Это позволяет выбрать маршрут для мини-трактора и успешно осуществлять его перемещение между микрогруппами, где расстояние между деревьями больше среднего расстояния в древостое. На основе анализа взаимного расположения мини-трактора и деревьев смежных микрогрупп, в которых проезд мини-трактора с прицепным устройством вызывает значительные риски повреждения деревьев, построен алгоритм маневрирования для этой транспортной системы и сформулированы ограничения ее входа в створ. Показано, что вход мини-трактора в створ между деревьями под прямым углом обеспечивает наилучшие условия пересечения створа. Минимальный радиус поворота транспортной системы, включающей мини-трактор с прицепным устройством, при перемещении под пологом древостоя должен быть меньше радиуса большей части микрогрупп, формирующих древостой. Выполнен расчет ширины коридора, необходимого для прохода мини-трактора с прицепным устройством при трелевке сортиментов длиной от 2 до 6 м в случае проведения проходной рубки в древостоях Ia, I, II и III классов бонитета при изреживании до относительной полноты 0,7. Показана возможность обоснования длины сортиментов при проведении проходной рубки в зависимости от



бонитета и возраста древостоя. Установлено соответствие параметров мини-трактора и длины сортиментов густоте формируемого древостоя, обеспечивающее беспрепятственное маневрирование мини-трактора с прицепным устройством при перемещении под пологом древостоя. Приведены рекомендации по коррекции маршрута при ширине требуемого коридора большей, чем среднее расстояние между деревьями в древостое.

Ключевые слова: проходные рубки, мини-трактор, движение мини-трактора, горизонтальная структура древостоя, минимизация повреждений древостоя, трелевка древесины, технологические параметры трелевки, расстояние между деревьями в древостое
Благодарности: Статья подготовлена по результатам работы над темой «Экологические аспекты рационального природопользования» (номер госрегистрации FEUG-2020-0013).

Для цитирования: Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Обоснование технологических параметров процесса трелевки древесины мини-трактором при проходных рубках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 126–138. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-126-138>

Original article

Substantiation of the Technological Process Parameters of Wood Skidding with a Mini Tractor in Increment Thinning

Eduard F. Gerts[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>

Andrey V. Mekhrentsev, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-5378-2020](https://orcid.org/0000-0002-2186-0152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>

Nikolay N. Terinov, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

Alina F. Urazova, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; gerz.e@mail.ru[✉], mehrenstev@yandex.ru, n_n_terinov@mail.ru, ura-alina@mail.ru

Received on December 25, 2021 / Approved after reviewing on March 27, 2022 / Accepted on March 30, 2022

Abstract. The paper considers the method of the mini tractor moving when skidding timber harvested during increment thinning. We analyzed the stand's horizontal structure formed as a result of intraspecific competition, as well as the partnership relations of the trees forming microgroups, the distance between which is less than the average distance between trees in the stand. The structure and parameters of the most typical microgroups that form stands were also observed. This allows choosing a route for a mini tractor and successfully moving it between microgroups, where the distance between trees is larger than the average distance in the stand. The article shows an analysis of the mutual arrangement of the mini tractor and trees of the neighboring microgroups, in which the passage of the mini tractor with a trailed device causes significant damage risks to trees. Based on the analysis, the maneuvering algorithm for this transport system is designed and the restrictions on its entry into the target between the trees are formulated. It is shown that the entry of a mini-tractor into the target between the



trees at a right angle provides the best conditions for crossing this area. The minimum turning radius of the transport system, comprising a mini-tractor with a trailed device, when moving under the stand canopy should be less than the radius of the majority of the microgroups that form the stand. The calculation of the strip width required for the passage of a mini-tractor with a trailed device when skidding logs with length 2–6 m in the case of increment thinning in stands of the Ia, I, II and III quality classes with thinning up to the relative density of 0.7. The paper shows the possibility of substantiating the length of logs when carrying out an increment thinning depending on the quality class and age of the stand. It is found that the mini tractor parameters and the logs length correspond to the formed stand density, ensuring the smooth maneuvering of the mini tractor with a trailed device when moving under the stand canopy. Guidelines for correcting the route when the width of the required strip is larger than the average distance between trees in the resulting stand are given.

Keywords: increment thinning, mini tractor, mini tractor motion, stand horizontal structure, minimizing stand damage, timber skidding, timber skidding technological parameters, distance between trees in the stand

Acknowledgments: The article is based on the results of work on the topic “Ecological Aspects of Sustainable Nature Management” (state registration No. FEUG-2020-0013).

For citation: Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Terinov N.N., Urazova A.F. Substantiation of the Technological Process Parameters of Wood Skidding with a Mini Tractor in Increment Thinning. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 126–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-126-138>

Введение

Одна из основных задач развития лесных предприятий на территориях с истощенными сырьевыми базами – совершенствование лесопользования с позиций производственно-экономической и лесоводственно-экологической эффективности. Важным элементом такого подхода при проведении проходных рубок, оказывающих существенное влияние на размерно-качественные характеристики деревьев к периоду технической спелости, является своевременность этих мероприятий [4, 8, 13, 15, 19, 21, 23, 24]. На фоне их неоспоримой значимости отмечаются некоторые негативные последствия [16, 18, 20, 22, 23]. Лесозаготовительные машины, в том числе и манипуляторные, используемые при проведении рубок ухода, удовлетворяют лесоводственным требованиям по критерию повреждаемости деревьев, оставляемых на доращивание, только при вырубке не менее 50 % древостоя [12]. Кроме того, в зоне технологических коридоров зафиксировано снижение массы корней деревьев в результате их механического повреждения и уплотнения почвы. Время восстановления корневой массы при этом пропорционально степени повреждений [9]. Снижение доли деформированных почвогрунтов (в том числе уплотненных) достигается не только выполнением работ в морозный период времени, но и применением базовых шасси, оказывающих минимальное давление на лесные грунты. Использование мини-тракторов позволяет уменьшить частоту и степень повреждения стволов деревьев, оставляемых на доращивание [6, 23]. Особая актуальность применения мини-тракторов в качестве шасси для лесохозяйственных агрегатов в сочетании с реализуемыми и перспективными технологиями отмечается в условиях проведения широкого комплекса лесохозяйственных работ [11].

Объекты и методы исследования

Для работы под пологом древостоя габариты мини-трактора и его маневренность должны максимально соответствовать горизонтальной структуре древостоя. Проходные рубки проводятся в насаждениях, характеризующихся широким диапазоном таксационных характеристик. Наиболее существенными из них при выборе мини-трактора являются густота произрастания деревьев и их распределение по площади. Сложившееся мнение, что размещение деревьев по территории с возрастом в процессе внутренней конкуренции меняется от первоначального группового или случайного на равномерное, в последнее время подверглось пересмотру. Этой концепции не удовлетворяют в первую очередь разновозрастные и условно-разновозрастные древостои, в которых выделяют такие «парцеллы», как окна без древесной растительности, группы деревьев и участки с подростом. Даже в культурах с изначально равномерным расположением деревьев к возрасту спелости распределение трансформируется в случайное [17]. Внутривидовая конкуренция в древостоях обеспечивает его самоизреживание, однако при этом сохраняется максимальная численность популяции за счет сокращения приростов деревьев [4, 13].

В ряде работ показано, что в древостоях наряду с конкурентными отношениями в микрогруппах действуют партнерские отношения, характеризующиеся разделением между деревьями экологических ниш как во времени, так и в пространстве [2, 3, 5, 10, 14]. При этом индивидуальная площадь питания для роста дерева является малозначимым фактором (менее 10 %). Вместе с тем прирост ствольной древесины коррелирует с площадью доминирования дерева, она должна составлять 30–40 % от площади свободного роста [2]. Тем не менее индивидуальные размеры дерева в большей мере определяются его генотипом, влияние которого в 4 раза выше, чем влияние площади питания [3]. В сосняках возрастом 55–90 лет число деревьев-соседей варьирует в микрогруппах от 4 до 12, 90 % из них имеют от 5 до 8 соседей [3]. Расстояние между деревьями в микрогруппах меньше среднего в древостое. При этом расстояние между соседними деревьями, принадлежащими к смежным микрогруппам, больше среднего. На рис. 1 приведены варианты размещения деревьев-соседей в микрогруппах.

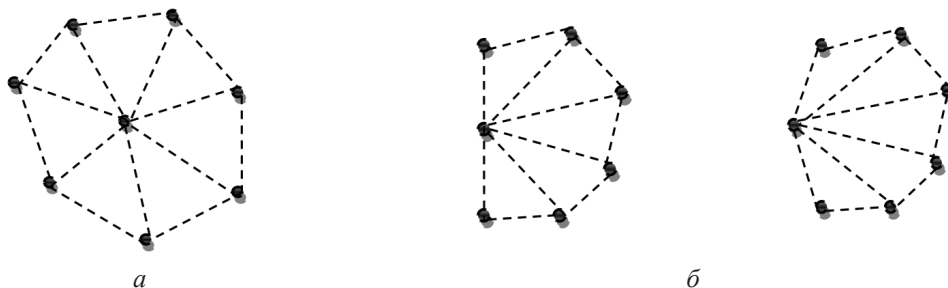


Рис. 1. Размещение деревьев в микрогруппах: *a* – наиболее распространенное; *б* – мало распространенное (периферия древостоя или «окон») [3]

Fig. 1. Trees arrangement in microgroups: *a* – most common; *b* – not common (periphery of the stand or “windows”) [3]

В рубку назначаются деревья, отставшие в росте. Это позволит к возрасту спелости с большей вероятностью получить древостой с меньшей дифференциацией деревьев по ступеням толщины. Из рис. 1, *a* видно, что площадь, занимаемая микрогруппой с центральным деревом, по контурам входящих в нее деревьев близка по форме к окружности с диаметром до двух средних расстояний между деревьями. Контуров включающих 5–7 деревьев микрогрупп без центрального дерева представляют собой многоугольник, больший размер которого в плане составляет до двух минимальных расстояний между деревьями в микрогруппе, ширина – одно среднее расстояние.

Таким образом, прокладывание маршрута мини-трактора между микрогруппами создает более благоприятные условия для его беспрепятственного прохода между деревьями. При этом снижаются риски повреждения деревьев, оставляемых на доращивание, за счет большего расстояния между деревьями смежных микрогрупп и меньшей крутизны маневрирования, чем при объезде отдельных деревьев. Меньшая крутизна маневрирования мини-трактора уменьшает ширину необходимого для перемещения прохода. Ширина прохода определяется шириной мини-трактора и уширением в результате разных траекторий движителей (колес или гусениц) тягача и прицепного устройства. Величина уширения прохода при этом прямо пропорциональна длине мини-трактора с прицепным устройством и обратно пропорциональна радиусу траектории перемещения [1].

Рабочий, управляя мини-трактором, выбирает маршрут, обеспечивающий выполнение заданного объема работ и минимальное повреждение элементов формируемого древостоя, ориентируясь на максимальные по ширине проходы. Однако и в этом случае ширина прохода на разных участках маршрута ограничивается деревьями, расстояние между которыми варьирует, начиная от минимального, близкого к среднему расстоянию в древостое. Прохождение таких минимальных створов между деревьями сопровождается максимальным риском повреждения деревьев. При выборе мини-трактора для выполнения рубок можно рассматривать эти условия как лимитирующие.

Наиболее благоприятные условия для прохождения мини-трактором створа между деревьями соответствуют пересечению этого створа под прямым углом, что показано на рис. 2, *a*, где A_1 – исходная позиция мини-трактора; A_2 – центр створа между деревьями; r – минимальный радиус поворота мини-трактора; B – точка пересечения исходного курса и курса прохождения створа деревьев; α – угол пересечения курсов мини-трактора до начала маневра и при прохождении створа.

Для соблюдения этого условия необходимый маневр (поворот) приходится выполнять на ограниченном пространстве между микрогруппами деревьев. Таким образом, возможность перемещения мини-трактора определяется его габаритами (ширина, длина) и маневренностью (минимальный радиус поворота и уширение необходимого прохода при повороте), а также возрастом и густотой древостоя, параметрами его микрогрупп.

Рабочий выбирает маршрут, ориентируясь визуально на расположение деревьев, расстояние между ними и наличие окон без деревьев и подроста. Анализируя ситуацию, оператор оценивает возможность входа в лимитиру-

ющий створ под минимальным углом и траекторию (маршрут) перемещения мини-трактора. Для входа в створ под прямым углом или близким к нему может понадобиться однократный (левый или правый) или двукратный (левый и правый) поворот.

Условие однократного поворота на угол α для прохода под прямым углом через створ (A_2) двух ближайших деревьев: $Y(B) < Y(A_2)$. При этом необходимый и достаточный для выполнения маневра угол: $\Delta X \geq r - r \cos(\alpha)$, $\Delta Y \geq r \sin(\alpha)$ (рис. 2).

При $Y(B) \geq Y(A_2)$ для прохода между двумя деревьями мини-трактору из позиции A_1 требуется выполнить два поворота: левый и правый. При этом необходимый и достаточный для выполнения маневра угол: $\Delta X \geq 2(r - r \cos(\alpha))$, $\Delta Y \geq 3r \sin(\alpha)$ (рис. 2, б).

Моделирование естественных процессов изреживания древостоев при проведении рубок ухода с учетом взаимодействия деревьев в микрогруппах создает специфическую ситуацию при выборе маршрута перемещения мини-трактора под пологом древостоя. Визуальная оценка ситуации и выбор рационального маршрута перемещения в древостое со случайным типом размещения деревьев усложняются в сравнении с их регулярным размещением. Однако при этом складываются более благоприятные условия для перемещения мини-трактора, что обуславливается меньшей крутизной маневрирования и большими расстояниями между деревьями смежных микрогрупп. Вместе с тем здесь предполагается более тщательный анализ ситуации при поиске альтернативных вариантов маршрута. Дополнительная вариативность при прокладке траектории движения мини-трактора заключается в выборе крутизны маневрирования на тех участках пути, где возможно сочетание радиальных кривых с участками прямолинейного движения как альтернатива повороту с большим радиусом.

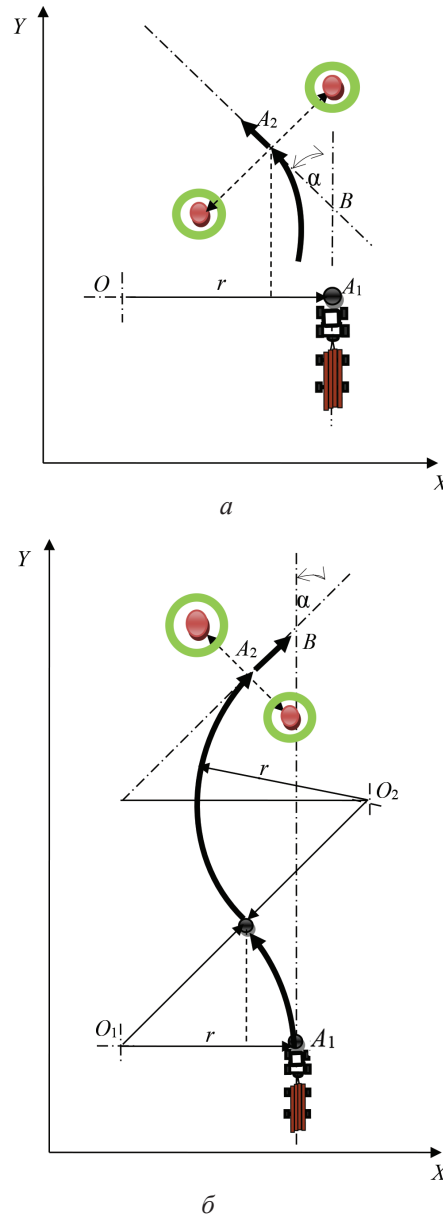


Рис. 2. Маршрут прохождения мини-трактором створа деревьев с поворотом: а – однократным; б – двукратным

Fig. 2. The route of the mini-tractor passing the target between trees with a turn: а – single turn; б – double turn

На рис. 3 показаны альтернативные варианты маршрута мини-трактора при маневрировании между микрогруппами деревьев.

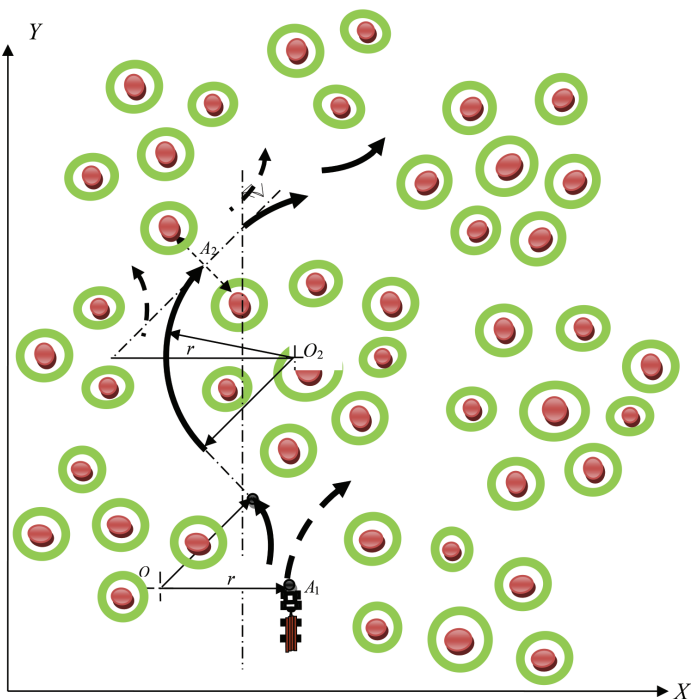


Рис. 3. Выбор маршрута перемещения мини-трактора под пологом древостоя

Fig. 3. Choosing a route for the mini tractor movement under the stand canopy

Схема для определения ширины прохода, необходимого для мини-трактора с полуприцепом, по радиальной кривой, приведенная на рис. 4, составит формулу

$$b_p = R_m - R_{п/п},$$

где R_m – радиус поворота мини-трактора, м; $R_{п/п}$ – радиус поворота внутреннего колеса полуприцепа, м.

Радиус поворота внутреннего колеса полуприцепа рассчитывается из уравнения

$$R_{п/п} = \sqrt{R_{змн}^2 - l_{п/п}^2} - b/2,$$

где $R_{змн}$ – радиус перемещения узла крепления дышла полуприцепа; $l_{п/п}$ – длина полуприцепа, м; b – ширина мини-трактора, м.

Минимальный радиус поворота мини-трактора с полуприцепом вычисляется из условия $R_{п/п} = 0$ и составит:

$$b_p = R_m \text{ или } R_m = \sqrt{l_{п/п}^2 + b^2/4} + b/2.$$

Радиус перемещения узла крепления дышла полуприцепа по отношению к мини-трактору

$$R_{змн} = R_m - b/2.$$

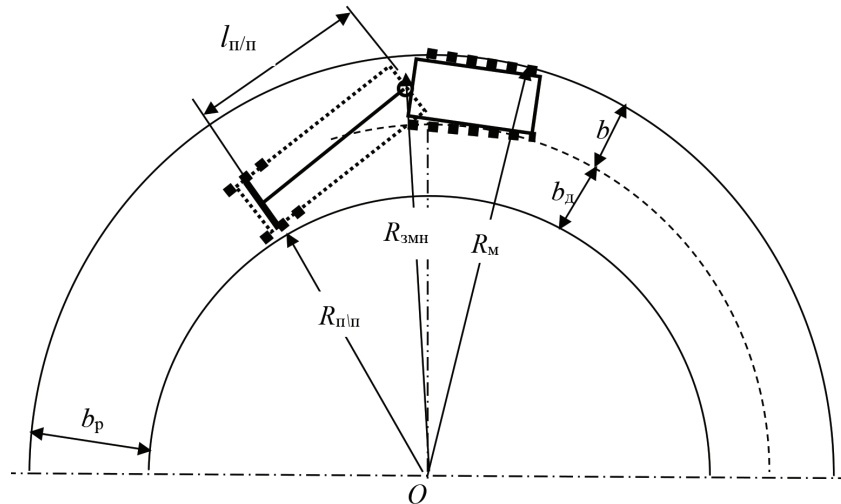


Рис. 4. Схема расчета расстояния между деревьями для прохода мини-трактора при повороте с полуприцепом [1]

Fig. 4. Calculating the distance between trees for the passage of a mini tractor with a semitrailer when turning [1]

Дополнительное уширение коридора для перемещения мини-трактора с полуприцепом по дуге

$$b_d = b_p - b.$$

Расстояние между деревьями, необходимое для беспрепятственного прохода мини-трактора с полуприцепом длиной $l_{п/п}$, лимитирует его ширину, которая определится как:

$$b \leq b_p + b_d + 2b_0, \quad (1)$$

где b_d – средний диаметр деревьев, ограничивающих створ, м; b_0 – расстояние безопасности между мини-трактором и деревьями, ограничивающими створ, $b_0 = 0,5$ м.

При проходе мини-трактором створа между деревьями под прямым углом необходимое расстояние между ними минимально. Возможность входа в створ под прямым углом определяется условиями маневрирования между микрогруппами деревьев, что обусловлено в первую очередь числом деревьев, их формой и занимаемой площадью (т. е. взаимным расположением деревьев). Границы наиболее распространенных микрогрупп деревьев по форме близки к радиальным кривым, радиус которых определяется их площадью (см. рис. 1). Перемещаясь по такому маршруту, мини-трактор, как правило, реализует повороты с радиусом не меньше радиуса кривой, описывающей границы микрогрупп:

$$r_{\text{мг}} \geq R_{п/п},$$

где $r_{\text{мг}}$ – минимальный радиус, описывающий границы микрогруппы, м.

Для расчетов нами были приняты таксационные характеристики нормальных древостоев из таблиц хода роста по В.В. Загрееву [7].

Проходные рубки в насаждениях Ia и II классов бонитета с преобладанием хвойных пород проводятся в возрасте 41–60 лет, в насаждениях III класса

бонитета – в возрасте 61–80 лет. Относительная полнота не может снижаться до уровня $< 0,7$. С учетом этого густота древостоя после рубок принята на 30 % ниже нормальной. Вырубке подлежат угнетенные деревья, отставшие в росте. При этом для деревьев, оставляемых на доразращивание, обеспечивается площадь доминирования не меньше 30–40 % от площади свободного роста. Площадь свободного роста рассчитывается на период времени до следующей рубки [3].

Обеспечение доминирования перспективных деревьев в молодняках осуществляется вырубкой деревьев-конкурентов, находящихся в непосредственной близости от них.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрен гусеничный пешеходно-управляемый мини-трактор с полу-прицепом, длина дышла которого определяется длиной трельюемых сортиментов. Ширина трактора – 1,15 м, ширина зоны безопасности между трактором и деревьями, ограничивающими коридор с каждой стороны, – 0,5 м, длина трельюемых лесоматериалов – от 2 до 6 м.

Результаты выполненных нами расчетов сведены в таблицу.

Расчет минимальной ширины коридора, требуемого при перемещении мини-трактора по дуге вокруг типичных групп, формирующих древостой The minimum strip width required when a mini tractor moves in an arc around typical stand-forming groups

Возраст, лет	Средние		Число стволов, шт./га, при полноте		Среднее расстояние между деревьями, м	Минимальная ширина коридора при длине сортиментов, м (значения ширины коридора, равные радиусу поворота мини-трактора, при $R_{\text{шп}} = 0$)				
	высота, м	диаметр, см	1,0	0,7		2	3	4	5	6
						(3,66)	(4,63)	(5,62)	(6,61)	(7,60)
<i>Ia класс бонитета</i>										
40	19,2	18,5	1483	1038	3,10	3,07	3,61	4,27	5,02	5,83
50	22,7	22,9	1073	751	3,65	3,03	3,52	4,14	4,85	5,63
60	25,5	27,0	822	575	4,17	3,01	3,46	4,04	4,71	5,45
<i>I класс бонитета</i>										
40	16,4	15,7	1773	1241	2,84	3,09	3,65	4,34	5,11	5,94
50	19,6	19,7	1259	881	3,37	3,04	3,55	4,19	4,92	5,72
60	22,2	23,2	969	678	3,84	3,01	3,49	4,09	4,78	5,55
<i>II класс бонитета</i>										
40	13,6	13,2	2161	1513	2,57	3,12	3,70	4,41	5,21	6,05
50	16,4	16,6	1537	1076	3,05	3,06	3,60	4,27	5,02	5,84
60	18,8	19,7	1167	817	3,50	3,02	3,52	4,15	4,87	5,66
<i>III класс бонитета</i>										
40	11,0	10,8	2750	1925	2,28	3,16	3,78	4,51	5,33	6,19
50	13,4	13,7	1939	1357	2,71	3,10	3,67	4,36	5,14	5,98
60	15,5	16,4	1460	1022	3,13	3,05	3,58	4,24	4,99	5,80
70	17,3	18,9	1157	810	3,51	3,01	3,51	4,14	4,86	5,65
80	18,8	21,2	958	671	3,86	2,99	3,46	4,06	4,76	5,52

Сравнение среднего расстояния между деревьями в древостое и ширины коридора, требуемого при объезде микрогруппы, характеризует возможность применения мини-трактора для трелевки сортиментов расчетной длины.

При ширине коридора, необходимого для маневрирования, меньше среднего расстояния между деревьями (l_{cp}) в формируемом древостое, мини-трактор с полуприцепом, выполняя поворот, гарантированно проходит в створы между деревьями, не являющимися частью микрогруппы. При проходе створа дополнительные ограничения на крутизну маневрирования ($l_{cp} \geq R_m$) не требуются.

При ширине коридора меньше среднего расстояния между деревьями объезд групп деревьев мини-трактором при рассматриваемой длине сортиментов возможен в случае выполнения условий:

тщательный выбор точки входа в створ при сокращении расстояния безопасности между мини-трактором и деревьями, лимитирующими створ, до меньшего, чем принято по условию уравнения (1);

увеличение радиуса маневрирования при прохождении створа между деревьями (т. е. уменьшение ширины требуемого для прохода коридора);

сочетание криволинейного движения при объезде микрогруппы и прямолинейного прохождения створа между деревьями.

Выводы

1. Основным фактором, определяющим возможность работы мини-тракторов под пологом древостоя, является густота древостоя.

2. Увеличение длины сортиментов от 2 до 6 м приводит к значительному росту рисков повреждения деревьев формируемого древостоя.

3. Беспрепятственное перемещение трелевочного мини-трактора под пологом древостоя ограничивается его шириной и длиной трелеваемых лесоматериалов.

4. Выбор рационального маршрута трелевочного мини-трактора при трелевке древесины под пологом древостоя осуществляется оператором посредством визуальной оценки альтернативных вариантов, с проходом через лимитирующий створ под прямым или близким к нему углом, что обеспечивает минимальное повреждение стволов деревьев формируемого рубками древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безгина Ю.Н., Герц Э.Ф., Иванов В.В., Перепечина Т.А., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Условия и возможность работы лесотранспортных систем под пологом древостоя // *Resources and Technology*. 2016. Т. 13, № 2. С. 20–33.

Bezgina Ju.N., Gerz E.F., Ivanov V.V., Perepechina T.A., Terinov N.N., Urazova A.F. Conditions and Ability to Work Forest Transport Systems under the Canopy of the Stand. *Resources and Technology*, 2016, vol. 13, no. 2, pp. 20–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2016.3221>

2. Борисов А.Н., Иванов В.В., Петренко А.Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // *Лесоведение*. 2019. № 1. С. 7–18.

Borisov A.N., Ivanov V.V., Petrenko A.E. Formation of Spatial Structure of Pine Stands Formed by Improvement Cuttings. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2019, no. 1, pp. 7–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010042>

3. Бузыкин А.И., Гавриков В.Л., Секретенко О.П., Хлебопрос Р.Г. Анализ структуры древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 1985. 93 с.

Buzykin A.I., Gavrikov V.L., Sekretenko O.P., Khlebopros R.G. *Analysis of the Structure of Forest Community*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 93 p. (In Russ.).

4. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Влияние густоты экспериментальных посадок на радиальный прирост сосны обыкновенной // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 29, № 3-4. С. 188–192.

Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S. Influence of Scots Pine Stands of Different Planting Densities on Radial Growth. *Conifers of the boreal area*, 2011, vol. 29, no. 3-4, pp. 188–192. (In Russ.).

5. Григорьева О.И., Ледяева А.С., Федорова А.Л. Перегруппировка деревьев в процессе роста и под влиянием рубок ухода в сосновых насаждениях // Изв. СПбЛТА. 2008. № 184. С. 28–34.

Grigoreva O.I., Ledyeva A.S., Fedorova A.L. The Process of Different Development Pine Stands of Grow and Influence Thinning. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2008, no. 184, pp. 28–34. (In Russ.).

6. Гусман Б.Л.А. Технологии рубок ухода – как объект оптимального управления лесосечными работами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1994. 23 с.

Gusman B.L.A. *The Thinning Technology as an Object of Optimal Management of Logging Operations*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 1994. 23 p. (In Russ.).

7. Загребев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов: справ. / под ред. О.А. Кочетовой. М.: Колос, 1992. 495 с.

Zagreev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. *All-Union Standards for Forest Inventory*: Handbook. Ed. by O.A. Kochetova. Moscow, Kolos Publ., 1992. 495 p. (In Russ.).

8. 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. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.9>

9. Карпечко А.Ю. Влияние несплошной рубки на тонкие корни и микоризные окончания ели обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 2. С. 23–32.

Karpechko A.Yu. The Effect of Partial Cutting on Tender Roots and Mycorrhiza of Norway Spruce. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 2, pp. 23–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.2.23>

10. Коцан В.В., Севко О.А., Демид Н.П. Проектирование рубок ухода в сосняках мшистых на основании их пространственной структуры // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 44. С. 33–36.

Kotsan W.W., Sevko O.A., Demid N.P. Design Thinning in the Pine Forests of Mossy Based on Their Spatial Structure. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2016, no. 44, pp. 33–36. (In Russ.).

11. Мясищев Д.Г. Потенциал малой механизации в лесохозяйственных технологических процессах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 1. С. 70–79.

Myasishchev D.G. Potential of Small-Scale Mechanization in Forestry Technological Processes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 1, pp. 70–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.70>

12. Пеккоев А.Н., Лукашевич В.М., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В. Опыты с рубками ухода разной интенсивности в сосновых древостоях // Уч. зап. ПетрГУ. 2015. № 2(147). С. 56–59.

Pekkoev A.N., Lukashevich V.M., Seliverstov A.A., Suhanov Yu.V. Experiments on Different Intensity Thinning of Pine Stands. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2015, no. 2(147), pp. 56–59. (In Russ.).

13. Пшеничникова Л.С. Влияние густоты экспериментальных посадок на радиальный прирост хвойных культур // Строение, свойства и качество древесины – 2018: материалы VI Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвящ. 50-летию Регионального Координационного совета по соврем. проблемам древесиноведения (Красноярск, 10–16 сент. 2018 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. С. 171–174.

Pshenichnikova L.S. Influence of Density of Experimental Plantings on the Radial Growth of Coniferous Cultures. *Wood Structure, Properties and Quality – 2018: In Honor of B.N. Ugolev. Proceedings of the 6-th RCCWS International Symposium Dedicated to the 50th Anniversary of the Regional Coordinating Council of Wood Science. Krasnoyarsk, September 10–16, 2018*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2018, pp. 171–174. (In Russ.).

14. Рогозин М.В. Площадь питания дерева как фактор его роста // Вестн. Перм. ун-та. Сер.: Биология. 2019. № 2. С. 136–147.

Rogozin M.V. Area for Tree Nutrition as a Factor of Its Growth. *Vestnik Permskogo Universiteta. Seria Biologia = Bulletin of Perm University. Biology*, 2019, no. 2, pp. 136–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2019-2-136-147>

15. Рогозин М.В., Разин Г.С. Фактор густоты в моделях ухода за древостоями // Охрана и рациональное использование лесных ресурсов: материалы VIII междунар. форума (Благовещенск, 8–10 июня 2015 г.). Благовещенск: ДальГАУ, 2015. Ч. 1. С. 234–239.

Rogozin M.V., Razin G.S. Factor Density in Models of Care Stands. *Protection and Efficient Usage of Forest Resources: Materials of VIII International Forum (Blagoveshchensk, 8–10 June 2015)*. Blagoveshchensk, Far Eastern SAU Publ., 2015, part 1, pp. 234–239. (In Russ.).

16. Селиверстов А.А., Лукашевич В.М., Суханов Ю.В., Пеккоев А.Н. Оценка воздействия проходных рубок ухода на древостои пробных площадей технопарка ПетрГУ // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1(13-1). С. 108–112.

Seliverstov A.A., Lukashevich V.M., Suhanov Yu.V., Pekkoev A.N. Assessing the Impact of Commercial Thinning on the Forest Simple Plots of Technopark PetrSU. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1(13-1), pp. 108–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/10090>

17. Товкач Л.Н. Размещение деревьев в 80-летних культурах ели, созданных равномерной посадкой семян // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2004. № 8. С. 60–62.

Tovkach L.N. Tree Arrangement in 80-year Old Spruce Populations Formed by Uniform Seedling Planting. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2004, no. 8, pp. 60–62. (In Russ.).

18. Тюкавина О.Н., Ильинцев А.С., Ершов Р.А. Влияние прореживаний на радиальный прирост сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 34–44.

Tyukavina O.N., Il'intsev A.S., Ershov R.A. The Effect of Thinning on the Radial Increment of Scotch Pine. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 4, pp. 34–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.34>

19. Grabarnik P., Särkkä A. Modelling the Spatial Structure of Forest Stands by Multivariate Point Processes with Hierarchical Interactions. *Ecological Modelling*, 2009, vol. 220, iss. 9-10, pp. 1232–1240. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.02.021>
20. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Assessment the Effect of Skidding Techniques on the Ecological Efficiency of the Skidding Tractor. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 67–75. <https://doi.org/10.29354/diag/125311>
21. Ma D., Peng S., Huang W., Cai Z., Xie Z. Rational Design of Mini-Cas9 for Transcriptional Activation. *ACS Synthetic Biology*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 978–985. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.7b00404>
22. Marchi E., Picchio R., Spinelli R., Verani S., Venanzi R., Certini G. Environmental Impact Assessment of Different Logging Methods in Pine Forests Thinning. *Ecological Engineering*, 2014, vol. 70, pp. 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.019>
23. Shabani S., Pourghasemi H.R., Blaschke T. Forest Stand Susceptibility Mapping during Harvesting Using Logistic Regression and Boosted Regression Tree Machine Learning Models. *Global Ecology and Conservation*, 2020, vol. 22, art. e00974. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00974>
24. Vusić D., Šušnjar M., Marchi E., Zečić Ž., Spina R., Picchio R. Skidding Operations in Thinning and Shelterwood Cut of Mixed Stands – Work Productivity, Energy Inputs and Emissions. *Ecological Engineering*, 2013, vol. 61, part A, pp. 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>

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

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

Научная статья

УДК 630.181+519.6

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-139-152

Оптимизация режимов работы лесопожарной машины

Е.А. Питухин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-4562-2016](https://orcid.org/0000-0002-7021-2995).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7021-2995>

С.С. Рогозин[✉], преподаватель; ResearcherID: [AFS-3782-2022](https://orcid.org/0000-0002-8602-8930).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-8930>

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; eugene@petrsu.ru, prerxa@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 12.01.22 / Одобрена после рецензирования 08.04.22 / Принята к печати 10.04.22

Аннотация. Рассматриваются специализированные лесопожарные машины, необходимые для тушения лесных пожаров. Представлен обзор отечественной и зарубежной современной лесопожарной техники и методов борьбы с лесными пожарами. Отмечается, что общим недостатком тепловой защиты лесопожарной машины является быстрый нагрев поверхностей ограждений кабин при ликвидации пожаров в экстремальных условиях. Следовательно, проблема повышения эффективности функционирования лесопожарной машины при тушении пожаров, задачи обеспечения работоспособности, оптимизации параметров и режимов работы, разработка и создание новых огнезащитных материалов, повышение показателей эргономики кабины и безопасности условий труда оператора остаются актуальными. Приводится обоснование оптимизации параметров и режимов работы лесопожарной машины на основе заданной тактической схемы организации тушения лесного пожара. В качестве целевой функции математической задачи оптимизации принята производственная мощность, т. е. площадь, которую можно потушить при помощи лесопожарной машины. В качестве управляющих факторов рассматриваются параметры основного и вспомогательного оборудования: производительность насосов, подающих воду и водные растворы пенообразователей; вместимость водного бака; время оцениваемого периода тушения лесного пожара и огнезащитные свойства элементов конструкции лесопожарной машины, а именно температура самовоспламенения теплоизоляции ограждения кабины. Математическая задача оптимизации решается аналитическим методом. Для проведения численных расчетов и программной реализации используются методы вычислительной математики и прикладного программирования. Решение задачи позволяет рассчитать производственную мощность лесопожарной машины, определить требуемые огнезащитные свойства поверхностей ограждений кабин и предложить новые конструкционные огнезащитные материалы, рекомендовать основное и вспомогательное оборудование. Улучшение эргономических показателей кабин во время тушения пожаров повысит безопасность условий труда оператора. Эффективная работа лесопожарной машины во время борьбы с огнем способствует снижению ущерба, наносимого окружающей среде, и убытков, являющихся последствием уничтожения миллионов гектаров леса.

Ключевые слова: лесные пожары, лесопожарная машина, режимы работы, оптимизация параметров работы, экологическая безопасность

Для цитирования: Питухин Е.А., Рогозин С.С. Оптимизация режимов работы лесопожарной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 139–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-139-152>

Original article

Optimizing the Forest Firefighting Vehicle Operation Modes

Eugene A. Pitukhin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-4562-2016](https://orcid.org/0000-0002-7021-2995).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7021-2995>

Stepan S. Rogozin[✉], Lecturer; ResearcherID: [AFS-3782-2022](https://orcid.org/0000-0002-8602-8930).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-8930>

Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; eugene@petsu.ru, ppeha@mail.ru[✉]

Received on January 12, 2022 / Approved after reviewing on April 8, 2022 / Accepted on April 10, 2022

Abstract. The article considers specialized forest firefighting vehicles required to extinguish forest fires. An overview of modern domestic and foreign forest firefighting equipment and techniques for fighting forest fires is presented. Rapid heating of the cabin enclosure surfaces is a common weakness of the thermal shielding of a forest firefighting vehicle when extinguishing fires in extreme conditions. Therefore, the following issues remain relevant: problem of increasing the forest firefighting vehicle operation efficiency when extinguishing fires; issues of ensuring the operability and optimization of operation parameters and modes; development and creation of new fire protection materials; improving the cabin ergonomics and operator safety. The paper provides substantiation for optimizing the parameters and operation modes of a forest firefighting vehicle on the basis of the given tactical scheme of forest fire extinguishing. The objective function of the mathematical optimization problem is the production capacity, i.e. the area that can be extinguished by a forest fire vehicle. As control factors we consider following parameters of main and auxiliary equipment: capacity of pumps supplying water and foam/water mixtures; water tank capacity; estimated time of forest fire extinguishing and flame retardant properties of the forest firefighting vehicle structure elements, particularly spontaneous ignition temperature of cabin enclosure thermal insulation. The mathematical optimization problem is solved by the analytical method. Methods of computational mathematics and applied programming are used for numerical calculations and software implementation. The solution of the problem enables to calculate the production capacity of a forest firefighting vehicle, determine the required flame retardant properties of the cabin enclosure surfaces and propose new structural fire-resistant materials, recommend the main and auxiliary equipment. Improving the ergonomics of cabins during firefighting will improve the safety of the operator's working conditions. The effective operation of a forest firefighting vehicle while firefighting reduces the damage to the environment and the losses caused by the destruction of millions hectares of forest.

Keywords: forest fires, forest firefighting vehicle, operation modes, optimizing operation parameters, environmental safety

For citation: Pitukhin E.A., Rogozin S.S. Optimizing the Forest Firefighting Vehicle Operation Modes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 139–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-139-152>



Введение

В последнее время из-за потепления климата частые лесные пожары причиняют значительный ущерб окружающей среде. Очаги возгорания, возникающие на обширной территории Российской Федерации, охватывают миллионы гектаров и приносят финансовые убытки. В связи с этим проблема борьбы с огненной стихией становится все более актуальной.

Для тушения огня на больших площадях целесообразно использовать специализированные лесопожарные машины (ЛПМ). Технические решения пассивной тепловой защиты ЛПМ включают в себя защиту оператора кабины от теплового воздействия при помощи ее теплоизоляции, экранирования и специального остекления. Материалы для пассивной защиты должны характеризоваться комплексными противопожарными свойствами и одновременно высокими показателями теплоизоляции, огнестойкости и механической прочности.

В качестве активных способов теплозащиты используются методы, основанные на испарении воды, стекающей по поверхности машины или распыленной вокруг нее в виде аэрозоля. Недостатками данных методов являются трудность защиты участков кузова со сложной конфигурацией и дополнительный расход воды, необходимой для тушения пожара [4, 5].

При тушении лесного пожара последовательно осуществляются (в соответствии с Лесным кодексом РФ, № 200–ФЗ, от 04.12.2006) остановка распространения его кромки, локализация и дотушивание очагов горения, оставшихся внутри пожарища. Для борьбы с верховым огнем на больших площадях оператор ЛПМ использует ручные пожарные стволы низкого и высокого давления в режиме работы как с водой, так и с водными растворами с пенообразователями. Передним навесным толкателем и задним навесным устройством ЛПМ возводятся противопожарные минерализованные полосы, которые являются эффективным средством для предупреждения низового пожара и предотвращения его распространения на соседние территории. При этом во время тушения огня ЛПМ воспринимает повышенные тепловые нагрузки [1, 2, 4, 6, 7].

Общим недостатком существующей тепловой защиты ЛПМ является быстрый нагрев поверхностей ограждений кабин в экстремальных условиях при ликвидации пожаров. Следовательно, проблема повышения эффективности функционирования ЛПМ при тушении пожаров, задачи обеспечения работоспособности, оптимизации параметров и режимов работы ЛПМ, разработка и создание новых огнезащитных материалов, повышение показателей эргономики кабины и безопасности условий труда оператора продолжают оставаться актуальными.

Одним из производителей ЛПМ является Онежский тракторный завод, который выпускает широкую линейку гусеничных машин и на их базе пожарный трактор – «Онежец-310». Эта лесохозяйственная спецмашина предназначена для тушения лесного пожара и проведения профилактических противопожарных работ. Кроме локализации и гашения очага пожара она также может эффективно ликвидировать источник возгорания складов леса и пиломатериалов, деревянных строений в труднодоступных местностях, использоваться для прокладки противопожарных полос, заброски пожарных команд, обустройства пожарных водоемов и в качестве передвижных перекачивающих насосных станций.

Разновидностью ЛППМ, выпускаемых Онежским тракторным заводом, является гусеничный трактор ЛХТ-100А-12, который предназначен для борьбы с лесными пожарами в труднодоступных местах на основе выполнения механизированных работ: локализации очагов возгорания посредством создания заградительных полос, заливки огненной кромки пожара водой, пеной или эмульсиями.

Алтайский тракторный завод выпускает трактор ТТ-4 «Алттрак ТЛП-4М-031». Он разработан как для заливки очагов лесных пожаров жидкими огнетушащими растворами и пеной, так и для прокладки заградительных полос с целью локализации очагов возгорания посредством минерализации почвы, доставки к месту пожара средств пожаротушения.

Лесопожарный трактор ТЛП 55.5.00.000 ВЛ Великолукского завода «Лесхозмаш» борется с лесными пожарами в труднодоступных местах механизированным способом путем тушения кромки пожара водой или огнегасящими эмульсиями, локализации лесных пожаров, создания опорных заградительных полос.

Лесопожарный агрегат ЛПА-521 Научно-производственной корпорации «Уралвагонзавод» им. Ф.Э. Держинского может доставлять силы и средства к месту ведения лесопожарных работ, тушить лесные низовые пожары огнегасящими жидкостями, воздушно-механической пеной, вести профилактические управляемые выжигания и создавать заградительные минерализованные полосы.

Гусеничный пожарный трактор МТ-ЛБу-ГПМ-10 производства «Муромтепловоз» разработан для комплексных работ в труднопроходимых условиях: доставки личного состава сотрудников МЧС, патрулирования лесных территорий, тушения пожаров и проведения спасательных работ, а также подачи воды к месту возгорания от различных источников.

Пожарная гусеничная машина RAC, сделанная в Германии, сочетает в себе традиционные и современные технологии пожаротушения для борьбы с крупномасштабными пожарами на нефтяных скважинах, нефте- и газопроводах, химических заводах и в лесу. Благодаря многофункциональности трактор может быть отнесен к специальному типу большинства современных средств пожаротушения.

Известный мировой производитель, канадская фирма КМК-Кootrac, выпускает специализированную высокоскоростную машину КМС 210 FT на гусеничном ходу, спроектированную для лесного хозяйства и работы на лесных пожарах. Агрегат способен функционировать в том числе на влажных и заболоченных почвах.

Китайская компания Lannmarker (Шанхай) производит гусеничную лесную пожарную машину FFV09. Многоцелевой трактор оснащен противопожарным оборудованием, которое может использоваться в зависимости от лесной пожарной обстановки, адаптирован к различным ландшафтам и способен преодолевать водные преграды.

Перспективно создание по модульному принципу многооперационных лесных машин, которые могли бы выполнять задачи при лесохозяйственных работах, а в пожароопасный период легко переоборудоваться в машины для борьбы с лесными пожарами. К настоящему времени на международном рынке

лесных машин представлены два варианта таких противопожарных форвардеров – компании TimberPro (США) и компании Ponsse (Финляндия).

Существует литература, посвященная разбору задач по расчету и оптимизации различных параметров организации тушения пожаров [5]. Также выполнены исследования, в которых разрабатывается задача планирования движения пожарных машин при многоточечных лесных пожарах, целью таких исследований является оптимальное направление ограниченного количества пожарных машин для тушения пожаров [19]. Однако тепловое воздействие на ЛПМ в работах не учтено. Рассматриваются циклические процессы тушения пожара и заправка водой баков пожарных машин, а также анализ и сравнение стратегий планирования работы пожарных машин [20]. При этом внимание уделено задаче тушения только нефтяных пожаров.

Маршрутизация в лесах с помощью беспилотных летательных аппаратов является продолжением классической работы ЛПМ. В борьбе с лесными пожарами важны наличие водных ресурсов и сеть обслуживания. Однако этот новый подход включает ограничения, связанные с аккумулятором дрона, а также проблему компромисса между временем и стоимостью патрулирования [12, 13, 16].

Цель исследования – формулирование и решение задачи оптимизации параметров и режимов работы ЛПМ в условиях чрезвычайных ситуаций – при тушении лесных пожаров.

Для этого необходимо решить следующие задачи: построить математическую задачу оптимизации и режимов работы ЛПМ; определить целевую функцию и управляющие факторы; выполнить численный расчет, найти оптимальные параметры оборудования и режимов работы ЛПМ.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ЛПМ, предметом – оптимизация параметров и режимов ее работы.

Любая математическая задача оптимизации включает в себя управляющие факторы, целевую функцию, область допустимых значений и может включать дополнительные ограничения на управляющие факторы, а также различные параметры или константы [9–11, 15, 17].

Рассматривается следующий элемент тактической схемы организации тушения лесного пожара. Пожарный расчет, включающий ЛПМ, прибывает на место пожаротушения с полным баком воды или водных растворов пенообразователей и производит заливку очага пожара в непосредственной близости от кромки пожара, в результате чего на ЛПМ оказывается тепловое воздействие, которое характеризуется температурой t^{fire} , °С, на поверхности источника тепла – очага пожара.

Номинальное время заливки τ^{nom} , с, зависит от технологической эффективности единицы ЛПМ – вместимости водного бака V , л, и производительности оборудования ЛПМ – скорости подачи воды или водных растворов пенообразователей под давлением Q , л/с, на месте пожаротушения:

$$\tau^{nom}(V, Q) = \frac{V}{Q}.$$

Элементы конструкции кабины ЛПМ и другие устройства, защищающие оператора, во время тушения огня воспринимают повышенные тепловые нагрузки, вследствие чего быстро нагреваются. При этом растет пожарная опасность, что может привести к воспламенению теплоизоляционного материала, которым облицовано металлическое ограждение кабины ЛПМ изнутри [8, 18].

При постановке задачи оптимизации параметров ЛПМ, таких как вместимость бака и производительность оборудования, были проведены исследования температурных зависимостей элементов конструкции ЛПМ от параметров композиционного материала, технологии его нанесения и времени теплового воздействия в виде вычислительного эксперимента [8]. В основу компьютерного моделирования положена математическая модель – система уравнений теплопроводности, уравнений Навье–Стокса и уравнение излучения, а также начальные и граничные условия. Решение данной системы производилось численно, методом конечных объемов при помощи программного пакета OpenFOAM. В частности, построена расчетная сетка области решения, включающая часть элемента конструкции плоского ограждения кабины ЛПМ площадью 1 м², и получено поле распределения температур в зависимости от времени, прошедшего с начала теплового воздействия.

Результаты численного эксперимента позволили представить зависимость критического времени работы ЛПМ τ^{cr} , с, от достижения теплоизоляционным материалом температуры самовоспламенения t^{sf} , °С, а также от теплового воздействия в виде

$$\tau^{cr} = f(t^{sf}, t^{fire}).$$

Максимально возможное время тушения лесного пожара τ^{max} , °С, ограничивается условием:

$$\tau^{max}(V, Q) = \min\{\tau^{nom}(V, Q), \tau^{cr}\}.$$

Тепловое воздействие со стороны очага пожара характеризуется зависимостью [8, 14]:

$$t^{fire}(\tau) - t_0 = 345 \lg \left(8 \cdot \frac{\tau}{60} + 1 \right), \quad (1)$$

где t_0 – начальная температура, °С, равная температуре окружающей среды для заданного региона эксплуатации ЛПМ; τ – период, соответствующий температуре, °С, на поверхности источника тепла (очага пожара), с.

В нашем случае уравнение (1) принимает следующий вид:

$$t^{sf}(\tau^{cr}) - t_0 = 345 \lg \left(8 \cdot \frac{\tau^{cr}}{60} + 1 \right).$$

Получаем зависимость критического времени работы ЛПМ от температуры самовоспламенения теплоизоляционного материала:

$$\tau^{cr}(t^{sf}) = 60 \left(10^{\frac{t^{sf} - t_0}{345}} - 1 \right) / 8. \quad (2)$$

Обозначим это уравнение как $\tau^{cr}(t^{sf}) = f(t^{sf})$.

Для тушения лесных пожаров необходимо обеспечить интенсивность подачи воды J^{\min} , л/(м²·с) [3, 5]: 1 и 0,1...0,15 л/(м²·с) при верховом и низовом пожаре соответственно.

Обозначим $U(Q)$, м²/с, – скорость тушения кромки, или площадь пожара, которая является функцией, зависящей от подачи воды. Если ввести величину k , л/м², – объем воды, л, необходимый для тушения 1 м² площади пожара, то $U(Q) = Q/k$.

В качестве целевой функции в данной модели рассматривается производственная мощность P , м², – это площадь, которую можно потушить при помощи ЛПМ:

$$P(V, Q, \tau^{cr}) = U(Q) \min \left\{ \tau^{nom}(V, Q), \tau^{cr} \right\} = \frac{Q}{k} \min \left\{ \frac{V}{Q}, \tau^{cr} \right\} = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau^{cr} \right\}. \quad (3)$$

Данное уравнение можно представить следующим образом:

$$P(V, Q, \tau) = U(Q) \min \left\{ \tau^{nom}(V, Q), \tau \right\} = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau \right\}. \quad (3, a)$$

Очевидно, что уравнения (3) и (3, а) идентичны. Таким образом, величины τ^{cr} и τ являются равнозначными.

Результаты исследования и их обсуждение

Существуют ЛПМ с вместимостью бака $V \in \{2500, 5000 \text{ и } 7000, \text{ л}\}$ и производительностью оборудования $Q \in \{7 \text{ и } 40, \text{ л/с}\}$ [3, 5].

Отсюда получаем следующую задачу оптимизации:

$$\begin{cases} P(V, Q, \tau^{cr}) = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau^{cr} \right\} \rightarrow \max; \\ V \in \{2500, 5000, 7000\}; \\ Q \in \{7, 40\}; \\ \tau^{cr} \in [0, \infty). \end{cases}$$

Здесь τ^{cr} – управляющий фактор, а V , Q и k – фиксированные параметры.

Эта задача имеет множество решений, поэтому постановка задачи оптимизации принимает следующий вариант: предположим, что множество допустимых значений V и Q дискретно. Для каждой пары значений (V, Q) существует максимальная производственная мощность $P^{\max}(V, Q)$, вычисляемая по уравнению (3). В этом случае рассматривается задача нахождения минимально возможного времени работы ЛПМ, при котором достигается максимальная производственная мощность. Данная постановка задачи обусловлена тем, что после израсходования полного бака воды для ЛПМ требуется покинуть зону пожаротушения с целью повторной заправки бака водой. Следовательно, для ЛПМ нет необходимости выдерживать тепловое воздействие со стороны очага пожара более длительное время.

Таким образом, получаем первую математическую задачу оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{(V, Q, \tau^{cr}) : \tau^{cr} \rightarrow \min, P(V, Q, \tau^{cr}) = P^{\max}(V, Q)\}; \\ P(V, Q, \tau^{cr}) = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau^{cr} \right\}; \\ V \in \{2500, 5000, 7000\}; \\ Q \in \{7, 40\}; \\ \tau^{cr} \in [0, \infty). \end{array} \right. \quad (4)$$

Решение математической задачи оптимизации (4) позволяет рассчитать минимальное время $\tau^{cr} \rightarrow \min$ работы ЛПМ, при котором достигается максимальная производственная мощность для каждой пары значений (V, Q) .

С учетом уравнения (2) для минимальной температуры самовоспламенения теплоизоляционного материала ограждения кабины ЛПМ, при которой достигается максимальная производственная мощность $P(V, Q, t^{sf}) = P^{\max}(V, Q)$, получаем вторую математическую задачу оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{(V, Q, t^{sf}) : t^{sf} \rightarrow \min, P(V, Q, t^{sf}) = P^{\max}(V, Q)\}; \\ P(V, Q, t^{sf}) = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} f(t^{sf}) \right\}; \\ V \in \{2500, 5000, 7000\}; \\ Q \in \{7, 40\}; \\ t^{sf} \in [0, \infty). \end{array} \right. \quad (5)$$

Здесь t^{sf} – управляющий фактор, а V, Q и k – фиксированные параметры.

Решение второй математической задачи оптимизации (5) позволяет рассчитать минимальную температуру самовоспламенения теплоизоляции $t^{sf} \rightarrow \min$, при которой достигается максимальная производственная мощность для каждой пары значений (V, Q) .

Математическая задача оптимизации (уравнения (4) и (5)) решается аналитическим методом (рис. 1, 2). В начальный момент времени принимаем температуру равной температуре окружающей среды для региона эксплуатации, Республики Карелии, $t_0 = 20$ °С [1, 3, 5]. Исходя из технических параметров работы водяных комбинированных насосов НЦПК-40/100-4/400-В1Т берем подачу воды $Q_1 = 7$ л/с и $Q_2 = 40$ л/с [1, 3, 5]. При этом параметрами вместимости бака являются значения $V_1 = 2500$ л/с; $V_2 = 5000$ л/с и $V_3 = 7000$ л/с. Средний расход воды для заливки 1 м² площади пожара зависит от интенсивности подачи воды, времени на тушение 1 м² и может меняться при изменении условий тушения пожара. Принимаем $k = 3$ л/м² [3, 5]. Данные начальные и граничные условия идентичны для первой и второй задачи оптимизации (уравнения (4) и (5)).

Первая математическая задача оптимизации (4) имеет аналитическое решение, показанное на рис. 1.

Рис. 1. Зависимость производственной мощности от времени работы ЛПМ при заданных значениях вместимости бака $V \in \{2500, 5000, 7000\}$ л и производительности оборудования: $a - 7$ л/с; $b - 40$ л/с

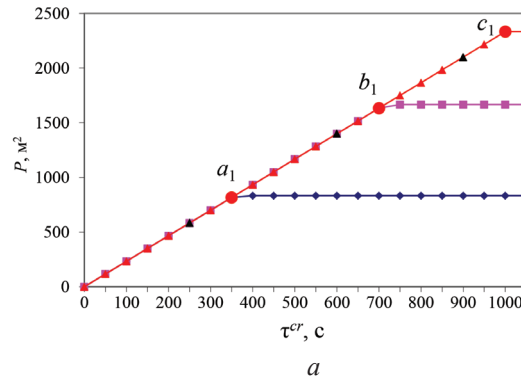
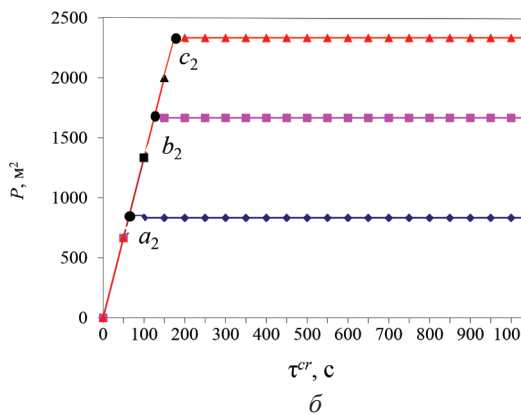


Fig. 1. Dependence of production capacity on operating time of the forest firefighting vehicle (FFV) at specified tank capacity values $V \in \{2500, 5000 \text{ and } 7000 \text{ L}\}$ and equipment performance: $a - 7$ L/s; $b - 40$ L/s



На графике рис. 1, а видно, что при увеличении времени работы ЛПМ производственная мощность возрастает линейно для производительности оборудования 7 л/с при заданных значениях вместимости бака до величины, при которой будет израсходован весь объем воды из бака, а затем перестает увеличиваться. При достижении своего максимума P становится константой. Точки a_1, b_1, c_1 принадлежат времени τ^{cr} , при котором достигается максимальная производственная мощность для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ.

Для решения задачи (4) найдем точку пересечения прямых: $y_1 = V/k$ и $y_2 = (V/k) \tau^{cr}$.

Получаем: $y_1 = y_2$, откуда $\tau^{cr} = V/Q$.

Решение задачи (4) для Q_1 :

$$P_1^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_1}^{\max}(V_1, Q_1) = 833; \tau_{a_1}^{cr} = 357; \\ P_{b_1}^{\max}(V_2, Q_1) = 1667; \tau_{b_1}^{cr} = 714; \\ P_{c_1}^{\max}(V_3, Q_1) = 2333; \tau_{c_1}^{cr} = 1000. \end{cases} \quad (6)$$

График рис. 1, б показывает, что при большей производительности оборудования – 40 л/с – производственная мощность растет быстрее и также носит линейный характер. Следовательно, быстрее достигается максимальное значение P для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ. Точки a_2, b_2, c_2

принадлежат времени τ^{cr} , при котором производственная мощность максимальна для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ. При достижении максимума P становится константой.

Аналогично получаем: $\tau^{cr} = V/Q$.

Определяем решение задачи (4) для Q_2 :

$$P_2^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_2}^{\max}(V_1, Q_2) = 833; \tau_{a_2}^{cr} = 63; \\ P_{b_2}^{\max}(V_2, Q_2) = 1667; \tau_{b_2}^{cr} = 125; \\ P_{c_2}^{\max}(V_3, Q_2) = 2333; \tau_{c_2}^{cr} = 175. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) являются решением первой математической задачи оптимизации (4). Расчеты показывают, что при обозначенных начальных и граничных условиях в случае подачи воды со скоростью 7 л/с получены минимальные значения $\tau^{cr}(a_1) = 357$ с, $\tau^{cr}(b_1) = 714$ с и $\tau^{cr}(c_1) = 1000$ с, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_1) = 833$ м², $P^{\max}(b_1) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_1) = 2333$ м². При подаче воды со скоростью 40 л/с получены минимальные значения $\tau^{cr}(a_2) = 63$ с, $\tau^{cr}(b_2) = 125$ с и $\tau^{cr}(c_2) = 175$ с, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_2) = 833$ м², $P^{\max}(b_2) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_2) = 2333$ м².

Вторая математическая задача оптимизации (5) также решается аналитическим методом (рис. 2). Заметим, что в отличие от первой задачи (4) для решения данной задачи и построения графиков используется уравнение (2) для зависимости времени работы ЛПМ от температуры самовоспламенения теплоизоляционного материала кабины.

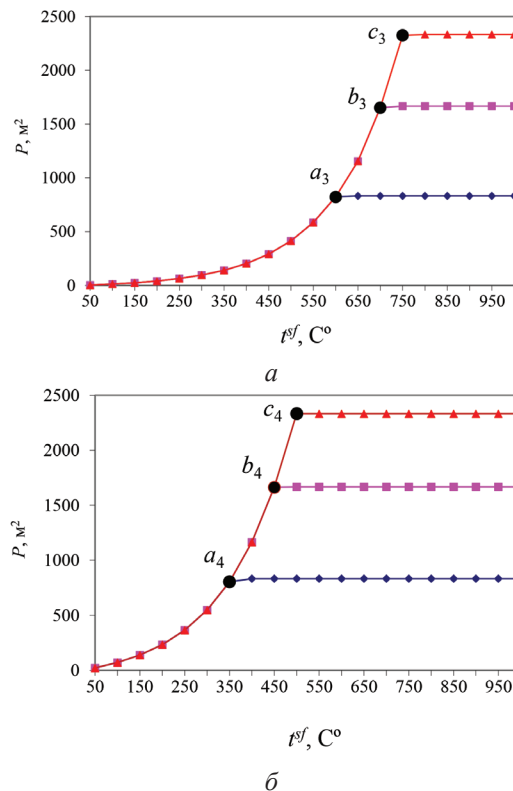


Рис. 2. Зависимость производственной мощности от температуры самовоспламенения теплоизоляции кабины ЛПМ при заданных значениях вместимости бака $V \in \{2500, 5000 \text{ и } 7000 \text{ л}\}$ и производительности оборудования: $a - 7$ л/с; $b - 40$ л/с

Fig. 2. Dependence of production capacity on spontaneous ignition temperature of FFV cabin insulation at specified tank capacity values $V \in \{2500, 5000 \text{ and } 7000 \text{ L}\}$ and equipment performance: $a - 7$ L/s; $b - 40$ L/s

На графике рис. 2, а точки a_3, b_3, c_3 принадлежат температуре самовоспламенения, при которой достигается максимальная производственная мощность для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ и производительности оборудования 7 л/с. Первоначально зависимость $P(V, Q) = f(t^{sf})$ носит степенной характер. При достижении своего максимума P становится константой.

Для решения задачи (5) найдем точку пересечения линий: $y_3 = V/k$ и $y_4 = (Q/k) \cdot f(t^{sf})$.

Получаем: $f(t^{sf}) = f^{-1}(V/Q)$.

Определяем решение задачи (5) для Q_1 :

$$P_3^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_3}^{\max}(V_1, Q_1) = 833; t_{a_3}^{sf} = 602; \\ P_{b_3}^{\max}(V_2, Q_1) = 1667; t_{b_3}^{sf} = 704; \\ P_{c_3}^{\max}(V_3, Q_1) = 2333; t_{c_3}^{sf} = 754. \end{cases} \quad (8)$$

На графике рис. 2, б видно, что при большей производительности оборудования – 40 л/с – производственная мощность растет быстрее и также носит степенной характер. Соответственно, быстрее достигается максимальное значение P для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ. Точки a_4, b_4, c_4 принадлежат температуре самовоспламенения, при которой значение P максимально для каждого заданного значения V . Изначально зависимость $P(V, Q) = f(t^{sf})$ имеет степенной характер. При достижении своего максимума P становится константой.

Получаем: $t^{sf} = f^{-1}(V/Q)$.

Определяем решение задачи (5) для Q_2 :

$$P_4^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_4}^{\max}(V_1, Q_2) = 833; t_{a_4}^{sf} = 355; \\ P_{b_4}^{\max}(V_2, Q_2) = 1667; t_{b_4}^{sf} = 450; \\ P_{c_4}^{\max}(V_3, Q_2) = 2333; t_{c_4}^{sf} = 498. \end{cases} \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) являются решением второй математической задачи оптимизации (5). Расчеты позволили выявить, что при обозначенных начальных и граничных условиях и подаче воды со скоростью 7 л/с получены минимальные значения $t^{sf}(a_3) = 602$ °С, $t^{sf}(b_3) = 704$ °С и $t^{sf}(c_3) = 754$ °С, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_3) = 833$ м², $P^{\max}(b_3) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_3) = 2333$ м². При подаче воды со скоростью 40 л/с получены минимальные значения $t^{sf}(a_4) = 355$ °С, $t^{sf}(b_4) = 450$ °С и $t^{sf}(c_4) = 498$ °С, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_4) = 833$ м², $P^{\max}(b_4) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_4) = 2333$ м².

Таким образом, в рамках работы построена и решена математическая задача оптимизации режимов работы ЛПМ, а также параметров основного и вспомогательного оборудования ЛПМ. Задача позволяет определить максимальную площадь заливки очага пожара за максимально возможный период времени с учетом теплового воздействия со стороны огненной стихии и теплозащитных свойств конструкционных материалов кабины ЛПМ при различных значениях

подачи воды (водных растворов) и вместимости бака ЛППМ на основе заданной тактической схемы тушения лесных пожаров.

При решении задачи используются линейные и степенные функции с заданными ограничениями и областью значений, а также ограничения на управляющие факторы и параметры модели, соответствующие реальным условиям. Корректное применение элементов теории теплопроводности, законов термодинамики и принципов компьютерного моделирования подтверждает адекватность предложенных моделей.

Результаты исследования позволяют: увеличить время нахождения ЛППМ в непосредственной близости от кромки пожара, что повышает возможность эвакуации команды ЛППМ из огненного очага лесного пожара при создании экстремальной ситуации (огненной ловушки, близости фронта пожара в результате смены направления распространения пожара); определить требуемые огнезащитные свойства конструкционных материалов для ЛППМ; рекомендовать теплозащитные материалы ограждений кабин ЛППМ; улучшить эргономические показатели кабин ЛППМ и повысить безопасность условий труда оператора.

Заключение

Сформулирована и решена задача оптимизации параметров и режимов работы лесопожарной машины при тушении лесных пожаров. В качестве целевой функции рассматривается производственная мощность – площадь, которую способна потушить лесопожарная машина. В качестве управляющих факторов принимаются параметры основного и вспомогательного оборудования лесопожарной машины: производительность насосов (скорость подачи воды); вместимость бака; время оцениваемого периода производственного процесса лесопожарной машины и температура самовоспламенения теплоизоляции ограждения кабины лесопожарной машины. Математическая задача оптимизации решена аналитическим методом.

Определены оптимальные параметры работы оборудования лесопожарной машины на основе заданной тактической схемы организации тушения лесного пожара при необходимых требованиях безопасности работы оператора. Рассчитаны минимальное критическое время работы лесопожарной машины, а также минимальная температура самовоспламенения теплоизоляции ограждения кабины лесопожарной машины, при которой достигается максимальная производственная мощность для каждого значения вместимости бака и скорости подачи воды.

Эффективная работа ЛППМ в условиях чрезвычайных ситуаций – тушения лесного пожара, обеспечивает экологическую безопасность с учетом необходимости снижения ущерба, наносимого окружающей среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ЕМИСС. Режим доступа: <https://fedstat.ru/> (дата обращения: 06.11.21). *The Unified Interdepartmental Statistical Information System (UISIS)*. (In Russ.).
2. Мазур Д.И., Ермолина М.А. Организационно-правовые меры предупреждения пожаров в России // *Russian Studies in Law and Politics*. 2020. Т. 4, № 3. С. 20–28.
Mazur D.I., Ermolina M.A. Organizational and Legal Measures to Prevent Forest Fires in Russia. *Russian Studies in Law and Politics*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 20–28. (In Russ.).

3. Методики расчета сил и средств для тушения пожаров / сост. Н.Ю. Клименти. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 28 с.
Methods for Calculating Forces and Means for Extinguishing Fires. Content by N. Yu. Klimenti. Volgograd, VSTU Publ., 2013. 28 p. (In Russ.).
4. Орловский С.Н., Бердникова Л.Н. Оптимизация технологий и средств пожаротушения при борьбе с лесными пожарами // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 2(137). С. 84–89.
Orlovsky S.N., Berdnikova L.N. The Optimization of Fire Extinguishment Techniques and Means in Forest Fire Fighting. *The Bulletin of KrasGAU*, 2018, no. 2(137), pp. 84–89. (In Russ.).
5. Повзик Я.С. Пожарная тактика. М.: Спецтехника, 2004. 416 с.
Povzik Ya.S. *Fire Fighting Tactics*. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2004. 416 p. (In Russ.).
6. Сосновчик Ю.Ф. Закономерность развития низовых лесных пожаров, метод профилактики и предотвращения распространения низового лесного пожара // Вавиловские чтения – 2017: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 130-й годовщине со дня рождения акад. Н.И. Вавилова. Саратов: Саратов. ГАУ, 2017. С. 259–266.
Sosnovchik Yu.F. Regularity of Development of Ground Forest Fires, Techniques of Prevention and Suppression of Ground Forest Fire. *Vavilov Readings-2017: Collection of Academic Papers of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 130th Anniversary since the Birth of Academician N.I. Vavilov*. Saratov, SGAU Publ., 2017, pp. 259–266. (In Russ.).
7. Станкевич Т.С. Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 20–34.
Stankevich T.S. Forecasting the Spatial Behavior of a Forest Fire at Uncertainty and Instability of the Process. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 20–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-20-34>
8. Устинов А.С., Рогозин С.С., Питухин Е.А. Разработка и реализация математической модели теплового воздействия на ограждающие конструкции, покрытые огнезащитным композитным материалом // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3(39). С. 41–48.
Ustinov A.S., Rogozin S.S., Pitukhin E.A. Development and Implementation of a Mathematical Model of the Thermal Effect on Enclosing Structures Covered with Fire-Retardant Composite Material. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 3(39), pp. 41–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-41-48>
9. Aslantas M. Finding a Solution to an Optimization Problem and an Application. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2022, vol. 194, pp. 121–141. <https://doi.org/10.1007/s10957-022-02011-4>
10. Bucur D., Buttazzo G., Nitsch C. Two Optimization Problems in Thermal Insulation. *Notices of the American Mathematical Society*, 2017, vol. 64, no. 8, pp. 830–835. <https://doi.org/10.1090/noti1557>
11. Chandrakantha L. Using Excel Solver in Optimization Problems. *Electronic Proceedings of the 23th Annual International Conference on Technology in Collegiate Mathematics (ICTCM)*. Denver, CO, 2011, pp. 42–49.
12. Chuvieco E., Aguadoa I., Yebraa M., Nieto H., Salas J., Martín M.P. et al. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
13. Cordeiro Ramalho A.H., da Silva E.F., Martins Silva J.P., Fiedler N.C., Maffioletti F.D., Biazatti L.D., Moreira T.R., Juvanhil R.S., dos Santos A.R. Allocation of Water

Reservoirs to Fight Forest Fires according to the Risk of Occurrence. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 296, art. 113122. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113122>

14. *International Standard. ISO 834–12:2012. Fire Resistance Tests. Elements of Building Construction. Part 12: Specific Requirements for Separating Elements Evaluated on Less than Full Scale Furnaces*. 2012. 9 p.

15. Kulkarni A.J., Krishnasamy G., Abraham A. *Cohort Intelligence: A Socio-Inspired Optimization Method*. Cham, Springer, 2017. 134 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44254-9>

16. Momeni M., Soleimani H., Shahparvari S., Afshar-Nadjafi B. Coordinated Routing System for Fire Detection by Patrolling Trucks with Drones. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, vol. 73, art. 102859. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102859>

17. Schittkowski K., Zillober C. *Nonlinear Programming: Algorithms, Software, and Applications. System Modeling and Optimization*. Ed. by J. Cagnol, J.P. Zolésio. Boston, MA, Springer, 2005, vol. 166, pp. 73–107. https://doi.org/10.1007/0-387-23467-5_5

18. Ustinov A., Pitukhin E. Improving the Efficiency of Protection of the Forest Fire Machine against Forest Fires with the Help of Composite Materials. *Materials Science Forum*. Switzerland, Trans. Tech. Publications Ltd, 2020, vol. 992, pp. 700–705. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.700>

19. Wu P., Chu F., Che A., Zhou M. Bi-Objective Scheduling of Fire Engines for Fighting Forest Fires: New Optimization Approaches. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, iss. 4, pp. 1140–1151. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2717188>

20. Zhou J., Tu C., Reniers G. Simulation Analysis of Fire Truck Scheduling Strategies for Fighting Oil Fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, vol. 67, art. 104205. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104205>

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

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



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 674.812

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-153-163

Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной

Д.С. Русаков, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4344-2779>

Г.С. Варанкина[✉], д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-1922-2019](https://orcid.org/0000-0003-3470-5124),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3470-5124>

А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [I-9432-2016](https://orcid.org/0000-0001-7914-8056),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7914-8056>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; dima-ru25@mail.ru, varagalina@yandex.ru[✉], a.n.chubinsky@gmail.com

Поступила в редакцию 25.11.21 / Одобрена после рецензирования 20.02.22 / Принята к печати 22.02.22

Аннотация. Существует множество методов анализа поверхностных явлений при склейке древесных материалов, взаимного расположения пор на подложке древесины и глубины проникновения жидкого клея в древесину. Наряду с оптическими используются электронно-микроскопические методы, атомно-силовая и сканирующая туннельная микроскопия, позволяющие оценить влияние факторов, характеризующих взаимодействие между молекулами жидкого клея и пористой поверхностью древесины. Для обоснования механизма взаимодействия модифицированных клеев с древесиной использовали фенолоформальдегидную смолу, модифицированную пектолом, и карбамидоформальдегидную смолу, модифицированную лигносульфонатами. Для исследования глубины проникновения клея в шпон применяли метод электронной микроскопии. Для производства фанеры брали модифицированные карбамидо- и фенолоформальдегидный клеи. После кондиционирования подготавливали образцы толщиной 0,025 мм и исследовали их на растровом электронном микроскопе. Показано, что при взаимодействии жидкого модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея с древесиной происходит последовательный рост молекулярной массы веществ и, соответственно, степени (глубины) проникновения. Исследуемые породы древесины – береза, сосна, лиственница – и модифицированные терморезистивные карбамидо- и фенолоформальдегидные клеи являются полярными материалами (клей взаимодействует с молекулами древесины с образованием межмолекулярных связей, в том числе водородных). Рост молекулярной массы и свободно сочлененный характер основной цепи (макромолекулы жидкого модифицированного клея), содержащей в большом количестве полярные функциональные группы (клея и древесины), способствуют межмолекулярной ассоциации. Формирование клеевого соединения на основе модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея с древесиной происходит за счет химического взаимодействия между гидроксильными группами макромолекул

целлюлозы и метоксильными группами карбамидной смолы с образованием сложных эфиров (атомы водорода гидроксильных групп ОН замещены на углеводородные радикалы R). Образование связи между клеем и поверхностью древесины – результат действия сил молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз жидкий клей – древесина, когда расстояние между молекулами одинаковой полярности (клея и древесины) составляет менее 0,5 нм. Далее наступает адсорбционное равновесие.

Ключевые слова: фенолоформальдегидная смола, карбамидоформальдегидная смола, модифицированный клей, взаимодействие модифицированного клея с древесиной, механизм взаимодействия модифицированного клея с древесиной, поверхностные явления на границе раздела фаз, глубина проникновения жидкого клея

Для цитирования: Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 153–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-153-163>

Original article

Theoretical and Experimental Substantiation of the Nature of Interaction between Modified Binders and Wood

Dmitry S. Rusakov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4344-2779>

Galina S. Varankina[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1922-2019](https://orcid.org/0000-0003-3470-5124)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3470-5124>

Anatoly N. Chubinsky, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [I-9432-2016](https://orcid.org/0000-0001-7914-8056)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7914-8056>

Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; dima-ru25@mail.ru, varagalina@yandex.ru[✉], a.n.chubinsky@gmail.com

Received on November 25, 2021 / Approved after reviewing on February 20, 2022 / Accepted on February 22, 2022

Abstract. There are numerous methods for analyzing surface phenomena when bonding wood materials, mutual arrangement of pores in the wood substrate, and depth of liquid adhesive penetration into wood. Electron microscopic methods such as atomic force and scanning tunneling microscopy are used along with optical methods. They allow evaluating the influence of factors describing the interaction between the liquid adhesive molecules and the porous wood surface. Phenol formaldehyde resin modified with pectol and urea formaldehyde resin modified with lignosulfonates were used for substantiation of the interaction mechanism between modified adhesives and wood. Electron microscopy was used to study the depth of adhesive penetration into veneer. The plywood was produced using modified urea and phenol formaldehyde adhesives. After conditioning, samples with a thickness of 0.025 mm were cut out and examined with a scanning electron microscope. The article shows that the interaction between liquid phenol formaldehyde adhesive modified with pectol and wood results in a sequential increase in the molecular weight of the substances and, consequently, in the penetration degree (depth). The studied wood species (birch, pine and larch) and modified thermosetting urea and phenol formaldehyde adhesives are polar materials (adhesive interacts with wood molecules with the formation of intermolecular bonds, including hydrogen bonds).



The molecular weight growth and the freely joined nature of the main chain (liquid modified adhesive macromolecules), which contains a large number of polar functional groups (adhesive and wood), promote intermolecular association. The formation of an adhesive bond between urea formaldehyde adhesive modified with lignosulfonates and wood occurs due to chemical interaction between hydroxyl groups of cellulose macromolecules and methoxyl groups of urea resin with the formation of esters (hydrogen atoms of hydroxyl groups OH are substituted with hydrocarbon radicals R). The formation of a bond between the adhesive and the wood surface is the result of molecular interaction forces at the liquid adhesive – wood interface, when the distance between molecules of the same polarity (adhesive and wood) is less than 0.5 nm. Then, adsorption equilibrium sets in.

Keywords: phenol formaldehyde resin, urea formaldehyde resin, modified adhesive, interaction between modified adhesive and wood, mechanism of interaction between modified adhesive and wood, surface phenomena at the interface, liquid adhesive penetration depth

For citation: Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Theoretical and Experimental Substantiation of the Nature of Interaction between Modified Binders and Wood. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 153–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-153-163>

Введение

Для анализа поверхностных явлений при склейке древесины [8–11], взаимного расположения пор на подложке древесины и глубины проникновения жидкого клея в древесину [9, 10] используют электронно-микроскопические методы, атомно-силовую и сканирующую туннельную микроскопию [12–20], позволяющие оценить влияние факторов, характеризующих взаимодействие между молекулами жидкого клея и пористой поверхностью древесины.

Пектол образуется смешиванием 60 % таллового пека с 40 % легкого таллового масла. Выбор пектола для модификации фенолоформальдегидных смол объясняется тем, что смоляные и жирные кислоты, входящие в состав этого продукта, реагируют с формальдегидом. В этом случае формальдегид может вступать в реакции присоединения по двойным связям жирных и смоляных кислот и участвовать в их этерификации (реакции получения сложного эфира).

В продуктах конденсации фенолоформальдегидных смол содержатся моно- и диметилфенолы, которые могут участвовать в реакциях этерификации с кислотами и реакциях присоединения по двойным связям. Изопимаровая кислота как один из представителей смоляных кислот вступает в реакцию присоединения по кратным связям с формальдегидом с образованием многоядерного циклического соединения [1, 8–11]. С *орто*-монOMETИЛОЛФЕНОЛОМ изопимаровая кислота реагирует с образованием тетрациклического бензоидного соединения. Пектолы значительно снижают содержание формальдегида в готовой продукции за счет химического связывания свободного формальдегида фенолоформальдегидной смолы со смоляными кислотами омыленного таллового пека. В результате реакции присоединения с разрывом кратных связей образуется многоядерный щелочной полимер.

Пектолы ускоряют процесс отверждения фенолоформальдегидных смол за счет замещения гидроксильных групп фенолоформальдегидной смолы катионами натрия мицелл омыленного таллового пека с уменьшением массовой

доли щелочи в клее и увеличением активности ионов водорода (т. е. pH). Мицеллы встраиваются в молекулу полимера фенолоформальдегидной смолы, формируя пространственно-разветвленную структуру, что ведет к образованию щелочного полимера с новым комплексом свойств, обеспечивающих ускорение процесса отверждения клея и повышение прочности склеивания [1–7].

Применение лигносульфонатов [8, 10] связано с ценными коллоидно-химическими свойствами этих полиэлектролитов, в частности высокой поверхностной активностью. Макромолекула лигносульфоната образует нелинейную структуру, приближающуюся к глобулярным полимерам [8]. Особенностью подобных структур является их компактность и гибкость, несмотря на большую молекулярную массу и относительно низкое содержание связанной воды. Макромолекулы лигносульфонатов разной степени дисперсности связаны друг с другом поперечными связями, главная из которых связь C_{β} -O- C_4 , также допускается наличие водородных связей. Чем выше молекулярная масса этих частиц, тем реальнее потенциальная возможность образования после соответствующей модификации 3-мерной структуры. Лигносульфонаты представляют собой анионноактивный полимер, содержащий метоксильные, фенольные, гидроксильные, карбонильные, карбоксильные и сульфогруппы в натриевой форме.

Цель данной работы – обоснование механизма взаимодействия модифицированных клеев с древесиной с позиций поверхностных явлений.

Объекты и методы исследования

Для исследования глубины проникновения клея в субстрат использовали метод электронной микроскопии. Фанеру размером 2440×1220 мм из древесины березы, осины и лиственницы склеивали в производственных условиях фанерного завода Братского лесопромышленного комплекса при температуре 115 °С и трех уровнях давления прессования – 1,2; 1,5; 1,8 МПа. Применяли модифицированные карбамидо- и фенолоформальдегидный клеи. После технологической выдержки в течение 24 ч вырезали образцы толщиной 0,025 мм и исследовали их на растровом электронном микроскопе.

Глубину проникновения жидкого карбамидо- и фенолоформальдегидных клеев в древесину (анализ проникающего вещества) определяли при помощи системы JED-2300T Analysis Station.

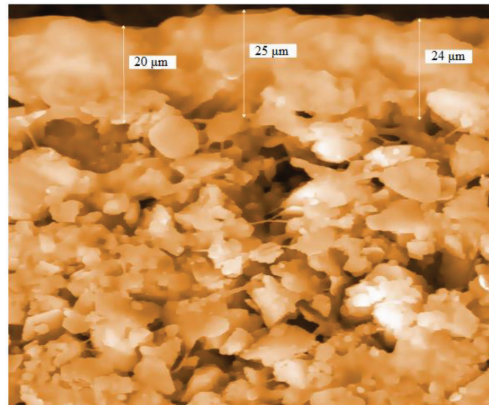
Результаты исследования и их обсуждение

Для определения характера взаимодействия модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея и древесины, глубины его проникновения в поры древесины проведен анализ показанных на рис. 1, 2 SEM- и EDS-изображений древесины, пропитанной клеем.

Химическое строение полимера влияет на характер адгезионного взаимодействия жидкий клей – субстрат, определяя пространственную структуру полимера, наличие в цепи макромолекулы боковых, полярных и функциональных групп, способных к физическому или химическому взаимодействию с поверхностью субстрата. Увеличение гибкости молекул адгезива (клея) приводит к большей свободе перемещения отдельных сегментов макромолекулы полимера и возможному контакту их с реакционно-активными центрами поверхности древесины.

Рис. 1. SEM-изображение, показывающее глубину проникновения в березовый шпон жидкого фенолоформальдегидного клея, модифицированного пектолом (увеличение в 40 000 раз)

Fig. 1. SEM image of the penetration depth of liquid phenol formaldehyde adhesive modified with pectol into birch veneer (40,000× magnification)



Рассмотрим первый подход к взаимодействию жидкого модифицированного клея с поверхностью древесины при условии смачивания и растекания его на подложке древесины. Данная теория учитывает возможность физико-химического взаимодействия жидкого клея с поверхностью древесины на молекулярном уровне.

Энергетическое состояние поверхности субстрата играет важную роль в фундаментальных физических процессах адсорбции, хемосорбции, миграции адсорбированных частиц вдоль поверхности и химическом взаимодействии частиц вблизи раздела двух фаз. Качество клеевых соединений в большой степени определяется уровнем адгезионного контакта на границе раздела фаз адгезив – субстрат, который в свою очередь зависит от характера межфазного взаимодействия.

В нашем случае для лиственных пород проникновение жидкого модифицированного клея на уровень клетки будет определяться размерами перфорированных отверстий в нижней и верхней частях клеток волокон либриформа. Отверстия пор в сосудах лиственных пород характеризуются большими размерами и хорошей проницаемостью. При взаимодействии (рис. 1) жидкого модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея с древесиной происходит последовательный рост молекулярной массы веществ и, соответственно, степени (глубины) проникновения (рис. 2). Исследуемые породы древесины и модифицированные термореактивные карбамидо- и фенолоформальдегидные клеи являются полярными материалами (клей взаимодействует с молекулами древесины с образованием межмолекулярных связей, в том числе водородных).

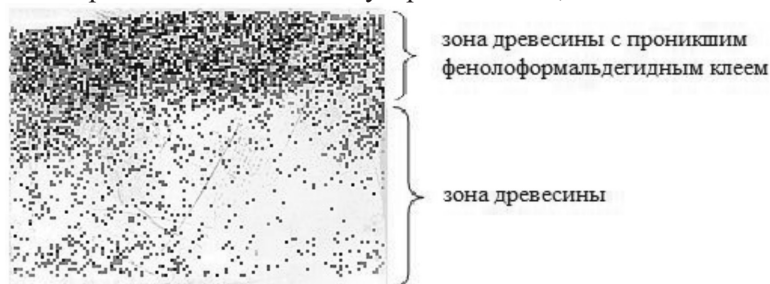


Рис. 2. EDS-изображение распределения элементов (по углероду) в структуре образца при использовании модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея

Fig. 2. EDS image of the elements distribution (by carbon) in the sample structure when using phenol formaldehyde adhesive modified with pectol

Взаимно притягиваясь, полярные молекулы модифицированного клея ориентируются между собой по отношению к полярным молекулам реакционноспособных активных центров на поверхности древесины. Качественное клеевое соединение при прочих равных условиях происходит в случае взаимодействия полярных материалов, причем при контакте важно, чтобы их полярность имела наименьшую разницу.

Установлено, что нанесенный на шпон клей адсорбируется древесиной (рис. 1). Исходя из этого, понятие «клеевой слой» может быть определено как зона древесины, пропитанная клеем.

На EDS-изображении (рис. 2) хорошо виден насыщенный слой, отражающий распределение углерода и характеризующий глубину проникновения в березовый шпон жидкого фенолоформальдегидного клея, модифицированного пектолом.

Второй подход к взаимодействию жидкого модифицированного клея с поверхностью древесины при условии смачивания и растекания его на подложке древесины предполагает химическое взаимодействие жидкого клея с высокомолекулярными компонентами древесины.

Для определения характера взаимодействия с древесиной и глубины проникновения в нее карбамидоформальдегидного клея, модифицированного лигносульфонатами, проведен анализ SEM- и EDS-изображений, показанных на рис. 3, 4.

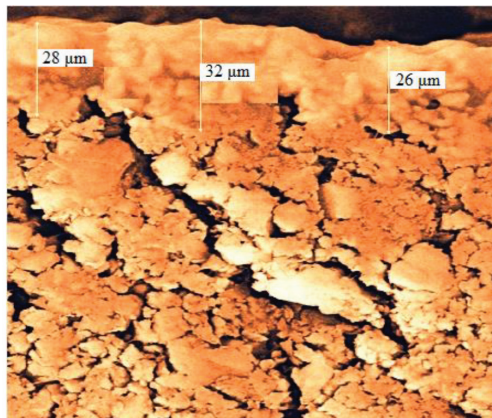


Рис. 3. SEM-изображение, показывающее глубину проникновения в березовый шпон жидкого карбамидоформальдегидного клея, модифицированного лигносульфонатами (увеличение в 40 000 раз)
Fig. 3. SEM image of the penetration depth of liquid urea formaldehyde adhesive modified with lignosulfonates into birch veneer (40,000× magnification)

Реакционноспособные высокомолекулярные компоненты, входящие в состав древесной матрицы, определяют ее строение. Лигнин и гемицеллюлозы, сосредоточенные большей частью в межклеточном веществе и поверхностных слоях, образующих лигноуглеводную матрицу, являются наиболее реакционноспособными в процессах химического взаимодействия высокомолекулярных соединений с компонентами древесины, в том числе и при поверхностных явлениях на границе раздела двух фаз (жидкий клей – древесина).

Важно, чтобы клеящее вещество и склеиваемые поверхности обладали полярными функциональными группами, способными к взаимодействию (гидроксильные OH, карбоксильные COOH, амидные NHCO). Клеящие свойства высокомолекулярных соединений определяются наличием в них функциональных групп, их активностью, количеством и расположением в структуре макромолекулы полимера.

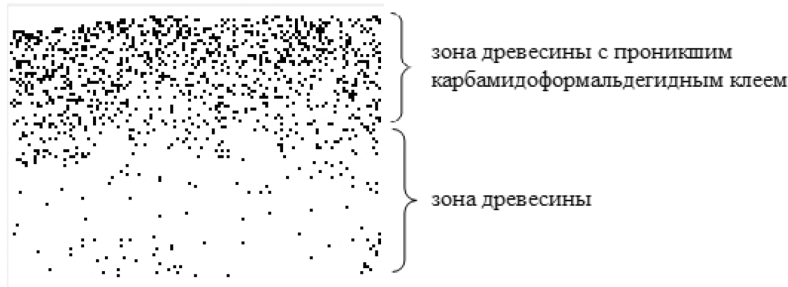


Рис. 4. EDS-изображение распределения элементов (по углероду) в структуре образца при использовании модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея

Fig. 4. EDS image of the elements distribution (by carbon) in the sample structure when using urea formaldehyde adhesive modified with lignosulfonates

Формирование клеевого соединения на основе модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея с древесиной происходит за счет химического взаимодействия между гидроксильными группами макромолекул целлюлозы и метоксильными группами карбамидной смолы с образованием сложных эфиров (атомы водорода гидроксильных групп OH замещены на углеводородные радикалы R).

Образование связи между клеем и поверхностью древесины (рис. 3, 4) – результат действия сил молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз жидкий клей – древесина, когда расстояние между молекулами одинаковой полярности (клея и древесины) составляет менее 0,5 нм, далее наступает адсорбционное равновесие. Смачивание, растекание и проникновение жидкого модифицированного клея в древесину сопровождается поверхностной диффузией и миграцией молекул клея по поверхности. На прочность адгезионной связи также влияет проникновение участков макромолекул жидкого олигомера, несущих активные реакционноспособные группы, в поверхность материала. Такая поверхностная диффузия продолжается, пока активные группы сегментов макромолекул не адсорбируются за счет физических или химических сил на поверхности материала. Между этими группами сегментов не образуется прочная адгезионная связь.

На глубину проникания клея в древесину (h , м) влияет макро- и микростроение древесины [9, 10], h может быть определена по приведенной ниже формуле в зависимости от вязкости связующего, которая в свою очередь является функцией температуры:

$$h = \frac{\Delta P}{n \cdot 4v\eta} R_k^2 \left\{ 0,4 \left[1 + 0,125(T - 20)^{0,5} \right] \right\},$$

где ΔP – давление плит пресса, Па; n – число полостей (капилляров) в единице площади, в которые проникает клей; v – скорость перемещения клея в древесине, м/с; η – динамическая вязкость клея, Па·с; R_k – эффективный радиус полости (капилляра) в древесине, м; T – температура клея, °С.

Число полостей (капилляров) в единице площади, в которые проникает клей, определяли по микрофотографиям срезов фанеры толщиной 0,025 мм.

Результаты расчета по приведенной формуле глубины проникновения модифицированных карбамидо- и фенолоформальдегидного клеев показаны в таблице.

Теоретические представления о характере взаимодействия жидкого клея с древесиной в целом согласуются с экспериментальными данными и расчетами, позволяют определить глубину проникновения жидкого клея в древесину и фактическую площадь его контакта с древесиной.

Сравнительная таблица результатов расчета глубины проникновения жидкого клея в березовый шпон, мкм

Comparative table of the results of calculating the liquid adhesive penetration depth in birch veneer, μm

Связующее	Значение	
	экспериментальное	теоретическое
Фенолоформальдегидный клей, модифицированный пектолом	20–25	27
Карбамидоформальдегидный клей, модифицированный лигносульфонатами	26–32	25

Примечание: Среднее число полостей (капилляров), в которые проникает клей, – 10.

Таким образом, с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского спектрального микроанализа были установлены характер распределения жидкого клея на поверхности и глубина его проникновения в поры древесины.

Выводы

1. При взаимодействии с древесиной жидкого фенолоформальдегидного клея, модифицированного пектолом, происходят нарастание молекулярной массы и увеличение глубины проникновения клея в древесину. Исследуемые породы древесины (береза, сосна, лиственница) и модифицированные термо-реактивные карбамидо- и фенолоформальдегидные клеи являются полярными материалами. Клей взаимодействует с молекулами древесины с образованием межмолекулярных связей, в том числе водородных.

2. Формирование клеевого соединения на основе модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея и древесины происходит за счет химического взаимодействия между гидроксильными группами макромолекул целлюлозы и метоксильными группами карбамидной смолы с образованием сложных эфиров (атомы водорода гидроксильных групп OH замещены на углеводородные радикалы R). Образование связи между клеем и поверхностью древесины – результат действия сил молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз жидкий клей – древесина, когда расстояние между молекулами одинаковой полярности (клея и древесины) составляет менее 0,5 нм, далее наступает адсорбционное равновесие.

3. Характер SEM- и EDS-изображений свидетельствует о взаимодействии жидких модифицированных отходами целлюлозного производства клеев с древесиной, глубина проникновения клея 20–30 мкм, что согласуется с общими представлениями молекулярно-адсорбционной теории жидких полимеров о взаимодействии с древесиной.

4. Глубину проникновения жидких модифицированных клеев оценивали по энергии эмиссии углерода на рентгеновских EDS-спектрах структуры образца. Спектры отвержденных образцов на основе модифицированных карбамидо- и фенолоформальдегидных клеев, более насыщенные по сравнению со спектрами образцов клея без модификаторов, имеют характерные полосы выделения углерода, что в целом свидетельствует о взаимодействии клея и древесины, проникновении модифицированных клеев в ее поры. Экспериментальные исследования и результаты расчетов глубины проникновения модифицированных карбамидо- и фенолоформальдегидных клеев в поры древесины в целом согласуются с теоретическими представлениями об этом процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Варанкина Г.С., Русаков Д.С. Модификация фенолоформальдегидной смолы побочными продуктами сульфатно-целлюлозного производства // Изв. СПбЛТА. 2013. Вып. 204. С. 130–137.

Varankina G.S., Rusakov D.S. Modification of Phenol Resin by the By-Products of Sulphate Pulp Production. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*, 2013, iss. 204, pp. 130–137. (In Russ.).

2. Варфоломеев А.А. Фенолоформальдегидные смолы, модифицированные лигнином // Перспективы развития технологии, экологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств: материалы науч.-практ. конф. Иркутск: ИрГТУ, 2007. С. 48–51.

Varfolomeev A.A. Phenol Formaldehyde Resins Modified with Lignin. *Prospects for the Development of Technology, Ecology and Automation of Chemical, Food and Metallurgical Industries: Proceedings of the Scientific and Practical Conference*. Irkutsk, ISTU Publ., 2007, pp. 48–51. (In Russ.).

3. Варфоломеев А.А., Синегибская А.Д., Гоготов А.Ф. Модифицированные лигнинфенолоформальдегидные смолы // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы III Всерос. конф.: в 3 кн. Барнаул: АлтГУ, 2007. Кн. 3. С. 128–132.

Varfolomeev A.A., Sinegibskaya A.D., Gogotov A.F. Modified Lignin Phenol Formaldehyde Resins. *New Achievements in Chemistry and Chemical Technology of Plant Raw Materials: Proceedings of the 3rd All-Russian Conference: In 3 Books*. Barnaul, ASU Publ., 2007, book 3, pp. 128–132. (In Russ.).

4. Кондратьев В.П. Новые виды экологически чистых синтетических смол для деревообработки // Деревообработ. пром-сть. 2002. № 4. С. 10–12.

Kondratiev V.P. New Types of Environmentally Friendly Synthetic Resins for Woodworking. *Derevoobrabatival'naya promishlennost' = Woodworking industry*, 2002, no. 4, pp. 10–12. (In Russ.).

5. Кондратьев В.П., Кондращенко В.И. Синтетические клеи для древесных материалов. М.: Науч. мир, 2004. 520 с.

Kondratiev V.P., Kondrashchenko V.I. *Synthetic Adhesives for Wood Materials*. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2004. 520 p. (In Russ.).

6. Кондратьев В.П., Чубов А.Б., Соколова Е.Г. Новые виды эффективных клеев для производства водостойкой экологически чистой фанеры // Изв. СПбЛТА. 2010. Вып. 191. С. 169–179.

Kondratiev V.P., Chubov A.B., Sokolova E.G. New Effective Adhesives For Manufacturing Of Water-Resistant And Ecologically Pure Plywood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy, 2010, iss. 191, pp. 169–179. (In Russ.).

7. Кондратьев В.П., Чубов А.Б., Соколова Е.Г. Совершенствование эксплуатационных свойств и технологии фанеры повышенной водостойкости // Изв. СПбЛТА. 2011. Вып. 194. С. 114–120.

Kondratiev V.P., Chubov A.B., Sokolova E.G. The Improvement of Application Properties and Technology of Increased Water Resistance Plywood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy, 2011, iss. 194, pp. 114–120. (In Russ.).

8. Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Модификация феноло- и карбамидоформальдегидных смол побочными продуктами производства целлюлозы // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 8. С. 16–21.

Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskiy A.N. Modification of Phenol- and Urea-Formaldehyde Resins by Additive Products of Cellulose Manufacture. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* = Adhesives. Sealants. Technologies, 2017, no. 8, pp. 16–21. (In Russ.).

9. Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н., Степаннищева М.В. Влияние строения и структуры древесины различных пород на расход клея при производстве фанеры // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4(44). С. 112–117.

Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N., Stepanishcheva M.V. The Influence of the Structure and Texture of Wood of Various Species on the Consumption of Glue in the Production of Plywood. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 4(44), pp. 112–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-4-112-117>

10. Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Варанкина Г.С. Совершенствование технологии склеивания древесных материалов модифицированными клеями. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. 127 с.

Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Varankina G.S. *Improving the Technology of Gluing Wood Materials with Modified Adhesives*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2019. 127 p. (In Russ.).

11. Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Русакова Л.Н., Варанкина Г.С. Исследование свойств модифицированных фенолоформальдегидных клеев // Изв. СПбЛТА. 2018. Вып. 222. С. 155–174.

Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Rusakova L.N., Varankina G.S. Investigation of the Properties of Modified Phenol-Formaldehyde Adhesives. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy, 2018, iss. 222, pp. 155–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.155-174>

12. Ravikovitch P.I., Neimark A.V. Calculations of Pore Size Distributions in Nanoporous Materials from Adsorption and Desorption Isotherms. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2000, vol. 129, pp. 597–606. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(00\)80262-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(00)80262-1)

13. Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.M., Pernicone N., Ramsay J.D.F., Sing K.S.W., Unger K.K. Recommendations for the Characterization of Porous Solids (Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 1994, vol. 66, no. 8, pp. 1739–1758. <https://doi.org/10.1351/pac199466081739>

14. Rouquerol J., Llewellyn P., Rouquerol F. Is the BET Equation Applicable to Microporous Adsorbents? *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2007, vol. 160, pp. 49–56. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80008-5)

15. Selbo M.L. *Adhesive Bonding of Wood*. Technical Bulletin No. 1512. Washington, D.C., USDA, 1975. 124 p.
16. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 1985, vol. 57, no. 4, pp. 603–619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
17. Stoeckli H.F., Kraehenbuehl F. The External Surface of Microporous Carbons, Derived from Adsorption and Immersion Studies. *Carbon*, 1984, vol. 22, iss. 3, pp. 297–299. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(84\)90174-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(84)90174-X)
18. Ugolev B.N. Wood as a Natural Smart Material. *Wood Science and Technology*, 2014, vol. 48, iss. 3, pp. 553–568. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0611-2>
19. Ustinov E.A., Fenelonov V.B., Yakovlev V.A., Eletsii P.I. Characterization of the Porous Structure of Carbon Materials by Means of Density Functional Theory. *Kinetics and Catalysis*, 2007, vol. 48, iss. 4, pp. 589–598. <https://doi.org/10.1134/S0023158407040180>
20. Walton K.S., Snurr R.Q. Applicability of the BET Method for Determining Surface Areas of Microporous Metal–Organic Frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, vol. 129, iss. 27, pp. 8552–8556. <https://doi.org/10.1021/ja071174k>

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

Научная статья

УДК 674.8;681.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-164-177

Резонансные акустические и колориметрические характеристики древесины из ретросооружений

В.И. Федюков[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [ABC-7222-2021](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4146-463X>

В.Ю. Чернов, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [X-4439-2019](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

М.С. Чернова, *аспирант*; *ResearcherID: [X-4073-2019](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0192-5158>

О.В. Цой, *соискатель*; *ResearcherID: [ABC-7278-2021](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8028-2201>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; fiv48@mail.ru[✉], ChernovVY@volgatech.net, ChernovaMS@volgatech.net, lelik-ka4@mail.ru

Поступила в редакцию 23.11.21 / Одобрена после рецензирования 24.02.22 / Принята к печати 25.02.22

Аннотация. Исследование взаимосвязи акустических и колориметрических показателей ретродревесины хвойных пород имеет важное научное и практическое значение для разработки неразрушающих способов идентификации резонансного материала в элементах старых сооружений с целью выявления дополнительных источников сырья при ограниченности запасов резонансной древесины в лесах. Представлены результаты комплексных дендроакустических и колориметрических исследований древесины ели и сосны. Обнаружено, что уровни RGB для состаренной древесины в аддитивной цветовой модели ниже в среднем на 12 %, чем для свежезаготовленной древесины. Для всех групп образцов состаренной древесины взаимосвязь уровней RGB с акустической постоянной слабая. Также выяснилось, 39 % образцов ели и 23 % образцов заболонной сосны, отобранных из состаренной древесины, можно отнести к резонансной древесине. Таким образом, старые деревянные конструкции из древесины ели и заболони сосны, подлежащие сносу в связи с длительным сроком эксплуатации, представляют большой практический интерес как источник для получения резонансной древесины с уникальными дендроакустическими свойствами. Установлено, в пределах одной породы или части дерева (заболонь, ядро) цвет остается постоянным, а варьирует лишь его оттенок. Несмотря на то, что результаты изучения колориметрических свойств древесины и акустической константы не показали высокий уровень взаимосвязи, исследования в данном направлении являются актуальными. Подобный результат может быть связан с несовершенством методики определения цвета, а именно с необходимостью учета разного количества и параметров годичных слоев, попадающих в измерительное окно колориметра.

Ключевые слова: древесина ели, древесина сосны, плотность древесины, акустическая константа, модуль упругости, определение дендроакустических параметров, колориметрия, RGB аддитивная цветовая модель

Для цитирования: Федюков В.И., Чернов В.Ю., Чернова М.С., Цой О.В. Резонансные акустические и колориметрические характеристики древесины из ретросооружений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 164–177. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-164-177>

Original article

Resonance Acoustic and Colorimetric Characteristics of Wood in Old Structures

Vladimir I. Fedyukov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABC-7222-2021](https://orcid.org/0000-0003-4146-463X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4146-463X>

Vasilii Yu. Chernov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

Maria S. Chernova, Postgraduate Student; ResearcherID: [X-4073-2019](https://orcid.org/0000-0002-0192-5158),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0192-5158>

Olga V. Tsoy, External PhD Student; ResearcherID: [ABC-7278-2021](https://orcid.org/0000-0001-8028-2201),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8028-2201>

Volga State University of Technology, pl. Lenin, 3, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation; fiv48@mail.ru[✉], ChernovVY@volgatech.net, ChernovaMS@volgatech.net, lelik-ka4@mail.ru

Received on November 23, 2021 / Approved after reviewing on February 24, 2022 / Accepted on February 25, 2022

Abstract. The reserves of resonance wood in the forests of the planet are limited, and in many countries they are completely absent, since it is formed only under certain habitat conditions in some trees with genetically determined properties. Therefore, the investigation of correlation between acoustic and colorimetric parameters of coniferous wood retreads has scientific and practical importance for the development of non-destructive methods of resonance material identification in the elements of old structures to reveal additional sources of raw materials. The article presents the results of complex dendro-acoustic and colorimetric studies of spruce and pine wood. The RGB levels for seasoned wood in the additive color model were found to be on average 12 % lower than those for recently harvested wood. The analysis showed that the interrelation of RGB levels with acoustic constant (K) is weak ($r^2 < 0.3$) for all groups of seasoned wood samples. It was also found out that 39 % of the spruce samples and 23 % of the pine sapwood samples selected from the seasoned wood can be attributed to resonance wood, since their $K \geq 12$ m⁴/kgs. Thus, old wooden structures made of spruce wood and pine sapwood to be slated for destruction due to the long term operation are of great practical interest as a source for producing resonance wood with unique dendro-acoustic properties. It was found that within the same wood species or part of a tree (sapwood, heartwood), the color remains constant, and only the tone varies. Although the results of the study of wood colorimetric properties and acoustic constant did not show a high level of correlation, the research in this area is still relevant. This result may be due to the imperfection of the color determination technique, namely the need to consider the different number and parameters of the annual rings that fall into the colorimeter measuring window. Overall, the results presented in this paper can be used in the development of new methods of express wood diagnostics in construction.

Keywords: spruce wood, pine wood, wood density, acoustic constant, modulus of elasticity, determination of dendroacoustic parameters, colorimetry, RGB additive color model



For citation: Fedyukov V.I., Chernov V.Yu., Chernova M.S., Tsoy O.V. Resonance Acoustic and Colorimetric Characteristics of Wood in Old Structures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 164–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-164-177>

Введение

Еще в 60-х гг. прошлого века в некоторых странах проводились исследования, направленные на искусственное старение древесины с целью получения более ценного материала путем внедрения современных технологий: конвективной сушки, сушки в токах сверхвысоких частот и др. [14, 17, 20, 21].

В России также осуществлялись опыты искусственного старения древесины, в том числе резонансной ели как материала для изготовления музыкальных инструментов, например, путем выдерживания древесины при температуре 110–190 °С в течение 10–48 ч и дальнейшей обработки раствором пероксида водорода при концентрации 10–15 % в течение 12–15 ч [1]. Был разработан новый способ обработки древесины ели в токах сверхвысоких частот, позволяющий улучшить ее резонансные свойства [12]. Однако результаты этих исследований пока не нашли практического применения из-за высоких экономических затрат.

Использование выдержанной древесины в старых сооружениях после нормативного срока их эксплуатации сопряжено с меньшими трудозатратами и, как следствие, значительно эффективнее, чем получение сортиментов путем традиционной технологии лесозаготовки и деревообработки, включая сушку, хранение и т. д.

Выдержанная в естественных условиях древесина особенно ценится в производстве музыкальных инструментов. Например, Амати, Страдивари, Гварнери и другие мастера староитальянской школы, а также французские мастера при изготовлении музыкальных инструментов (скрипок) использовали выдержанную в течение не менее 14 лет древесину ели для верхней деки; при отборе этого материала большое значение имел цвет древесины не только как важная эстетическая характеристика, но и как признак акустического качества [3, 12, 18].

Сегодня острый дефицит в резонансной древесине наблюдается, кроме как в производстве музыкальных инструментов, при изготовлении акустических панелей для обшивки внутренних стен зрительных залов театров и консерваторий [13]. Например, по оценке ЮНЕСКО Большой театр в Москве благодаря внутренней акустике вошел в перечень выдающихся творений мирового зодчества. Основная заслуга здесь принадлежит петербургскому архитектору А.К. Кавосу. При проектировании объемной формы зрительного зала он применил принцип устройства скрипки, а для обшивки стен использовал резонансную древесину ели с соответствующими дендроакустическими показателями [5].

Таким образом, исследование акустических и колориметрических показателей древесины имеет не только теоретическое, но и важное практическое значение для устранения дефицита материала при изготовлении музыкальных инструментов и акустических панелей путем разработки неразрушающего способа экспресс-диагностики и отбора резонансного материала в старых сооружениях, подлежащих сносу.

В последние годы появляются научные работы, направленные на выявление технического ресурса ретродревесины хвойных пород в элементах деревянных конструкций для использования и в других областях производства [7].

Резонансная древесина формируется в определенных условиях местопроизрастания у некоторых деревьев, что обусловлено их генетикой. Как следствие, запасы такой древесины в лесах планеты ограничены, а во многих странах отсутствуют [12, 15, 16, 19]. В России до 1911 г. музыкальные фабрики использовали в основном заграничное сырье, т. к. считалось, что резонансная древесина формируется только в еловых насаждениях Европы, на территории горных лесов Карпат, Тиролевских и Баварских Альп, в суровых условиях возвышенности и на северных склонах с бедной каменистой почвой. Однако благодаря научным изысканиям профессора Лесного института Н.А. Филиппова было доказано наличие резонансной ели в отечественных лесах [8]. В дальнейшем это было обосновано академиком И.С. Мелеховым тем, что не только горные, но и равнинные типы леса и лесорастительные условия формируют физико-механические, в том числе резонансные, свойства древесины [6].

Более поздние исследования, выполненные в лесах Волжско-Камского региона России, подтвердили эти выводы и уточнили: в наших лесах лучшими условиями для формирования резонансной древесины являются ельники черничные, где произрастают спелые и даже перестойные древостои ели II–III классов бонитета, а в отдельных случаях – ельники травяно-болотные низинного типа увлажнения, включая объекты давней гидролесомелиорации [12].

Физико-механические показатели древесины, включая ее резонансные свойства, во многом предопределены содержанием органических веществ [11, 12]. В отличие от элементного химического состава, относительное содержание органических веществ в древесине одной породы не остается неизменным. Кроме породы на него влияют местоположение исследуемой части древесины в стволе, возраст и условия произрастания дерева [4]. Долгое выдерживание древесины в естественных условиях также оказывает существенное влияние на относительное содержание органических веществ, что вызывает изменение ее физико-механических и акустических свойств [9, 10].

Исследования выдержанной в течение 5–20 лет древесины пород, произрастающих на территории России, выявили небольшое отличие по цветовому тону, т. е. длина волны отражаемого спектра лежит в пределах 578–585 нм, что соответствует желтому участку спектра. Однако наблюдается большое колебание по чистоте и светлоте цвета. Первый показатель изменяется в пределах 30–50 %, а второй в еще большей амплитуде – 20–70 % [11].

Пригодность материала для изготовления деки – основной звукоизлучающей детали струнных и струнно-щипковых музыкальных инструментов – многие мастера оценивают субъективным определением цвета [3]. Поэтому пока нет единого мнения о цвете древесины как визуальном диагностическом признаке акустических свойств: одни мастера предпочитают для деки древесину ели более светлых, белых, а другие – желтых тонов [3, 15].

Даже официальные стандарты предъявляют разные требования к цвету резонансного материала. Например, ТУ 205 РФ 08.866–89 (взамен ГОСТ 6900–83) допускают «желтый приемлемый» цвет древесины ели, а стандарт Польши Р-63 095071 для этой же породы и пихты – «белый»; действующий стандарт ТСИ 15799/12 (Германия) – «однотонно светлый».

Возможно, существующие противоречивые взгляды среди ученых и специалистов музыкального производства вызваны тем, что пока нет объективных научных подтверждений в пользу того или иного цвета резонансной древесины, т. е. не проведено специальных исследований по установлению взаимосвязи между колориметрическими и акустическими параметрами данного материала.

К современным работам в области старения древесины следует отнести исследования швейцарского профессора P. Navi, который изучал древесину хвойных пород, преимущественно ели [17]. Он пришел к выводу, что возможно прогнозировать и контролировать изменения свойств древесины, если рассматривать процесс ее старения как структурные изменения, соответствующие нестабильному стеклообразному состоянию, на основе параметров температуры и давления окружающей среды, а также механических нагрузок и внутренних напряжений. Все эти факторы воздействуют на строительные конструкции из древесины.

После длительной эксплуатации в сооружениях за счет изменения соотношения органических веществ физико-механические свойства древесины стабилизируются, повышаются модуль упругости [9, 10] и резонансные свойства: увеличивается доля лигнина и уменьшается содержание гемицеллюлозной фракции (пентозанов). В то же время состаренная древесина имеет меньшую плотность по сравнению со свежезаготовленной, даже хорошо высушенной древесиной. Главное преимущество музыкальных инструментов, изготовленных из выдержанной в естественных условиях древесины, заключается в обеспечении стабильности издаваемых звуковых спектров при изменении условий внешней среды [11].

Цель работы – получение данных о взаимосвязи акустических и колориметрических показателей выдержанной древесины ели и сосны, которые могут послужить основой для разработки новых методов и устройств неразрушающей экспресс-диагностики резонансных свойств древесины.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в условиях Камско-Волжского региона России. Данный регион входит в зону таежных лесов, где еще сохранились запасы резонансной древесины [12].

В качестве объекта исследования выбран бревенчатый дом (рис. 1, *a*), который построен примерно 70 лет назад из древесины ели (*Picea*) и сосны (*Pinus*), в настоящее время он не эксплуатируется. Проведение исследований на одном объекте обусловлено тем, что цель работы заключалась в апробации методик экспресс-диагностики и подтверждении предположения о возможности использования цвета древесины как диагностического признака резонансных свойств ретродревесины.

С четырех сторон дома были выпилены фрагменты (части бревна) длиной по 600 мм (рис. 1, *б*). Из данных фрагментов изготовлены образцы для колориметрических и ультразвуковых исследований (рис. 2). В момент испытаний древесина имела комнатно-сухую влажность, которая определялась стандартным методом (ГОСТ 16483.7–71).



а

б

Рис. 1. Объект исследования (а) и стена после взятия фрагментов для изготовления опытных образцов (б)

Fig. 1. The study object (a) and the wall after removing fragments to make samples (b)



Рис. 2. Последовательность изготовления образцов

Fig. 2. Sequence of samples preparation

Определение колориметрических показателей древесины. Подготовленные образцы исследовались на изменение цвета с помощью RGB-модели. Данная модель основана на измерении уровней красного, зеленого и синего цвета как составляющих любого цвета в природе. Ее универсальность заключается в возможности применения как специальных, так и простых компьютерных программ, например MS Paint, для визуализации, обработки, измерения и прогнозирования цвета (колориметрических показателей) поверхностей исследуемых объектов.

Для определения RGB-уровней – уровней красного (R), зеленого (G) и синего (B), составляющих цвета древесины, – использовался колориметр PCE-RGB 2 (PCE Group Co KG, г. Мешед, Германия) (рис. 3).

Рис. 3. Колориметр PCE-RGB 2

Fig. 3. PCE-RGB 2 colorimeter



Измерение проводилось на той стороне образцов, где годовые кольца располагались в радиальном направлении. Разрешающая способность PCE-RGB 2 – 1/1000. На рис. 4 для сравнения приведены фотографии образцов, изготовленных из выдержанной и свежезаготовленной древесины.



Рис. 4. Сопоставление дощечек выдержанной (сверху) и свежей (снизу) древесины ели

Fig. 4. Color comparison of seasoned spruce wood (top) versus recently harvested spruce wood (bottom)

Образцы выдержанной и свежезаготовленной древесины исследовались в одинаковых условиях. Для получения наиболее точных результатов механическая обработка поверхности образцов осуществлялась непосредственно перед исследованием, чтобы исключить случайный фактор – изменение цвета при хранении. Было изготовлено по 15 образцов выдержанной и свежезаготовленной древесины.

Под воздействием внешних факторов (свет, в том числе ультрафиолетовый спектр; температура; ветровой режим; влажность) древесина изменяет свой цвет в первую очередь на поверхности. Поэтому непосредственно перед измерением осуществлялась неглубокая шлифовка измеряемого участка, а для достижения точности и репрезентативности результатов измерения уровней RGB дублировались в 3 точках (рис. 5). Полученные цветовые уровни по каждому образцу усреднялись.

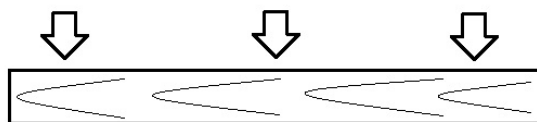


Рис. 5. Схема измерения цвета древесины

Fig. 5. Wood color measurement scheme

Обработка результатов исследований выполнялась методами статистического и регрессионного анализа с помощью программ Statistica и TableCurve 2D.

Дендроакустические исследования. Резонансные показатели древесного материала определяются по формуле академика Н.Н. Андреева через акустическую константу [2]:

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} = \frac{c}{\rho},$$

где E – динамический модуль упругости, МПа; ρ – плотность древесины, кг/м³; c – скорость звука в древесине, м/с.

Исследования выполнялись ультразвуковым способом с помощью прибора УК-14 П по стандартной методике, которая заключается в предварительном кондиционировании древесины до влажности 12 % и последующем определении ее плотности стереометрическим методом (ГОСТ 16483.1–84). Схема ультразвуковых исследований стандартных образцов представлена в работе [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Средние расчетные значения акустической константы и уровней RGB по каждой группе образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Соотнесение результатов исследования колориметрических характеристик и акустической константы выдержанной и свежезаготовленной древесины
The research results of colorimetric characteristics (RGB) and acoustic constant (K) of seasoned and recently harvested wood

Образец древесины	R	G	B	K, м ⁴ /(кг · с)
Выдержанная ель	0,866	0,766	0,616	11,527
Свежезаготовленная ель	0,951	0,858	0,714	9,500
Выдержанная заболонная сосна	0,839	0,747	0,578	10,486
Свежезаготовленная заболонная сосна	0,866	0,740	0,572	10,080
Выдержанная ядровая сосна	0,751	0,621	0,474	9,963
Свежезаготовленная ядровая сосна	0,834	0,709	0,546	10,340

Статистические показатели результатов исследования акустической константы представлены в табл. 2 и на рис. 6, а составляющих уровней цветов (RGB) – в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 2

Статистические показатели результатов исследования акустической константы
Main statistics on acoustic constant

Образец древесины	Объем выборки, шт.	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
Выдержанная ель	15	11,60	11,39	10,42	13,23	0,614	0,784
Свежезаготовленная ель	5	9,51	9,50	9,23	9,80	0,059	0,244
Выдержанная заболонная сосна	15	10,49	10,89	7,70	12,20	2,223	1,491
Свежезаготовленная заболонная сосна	5	10,10	10,00	9,89	10,52	0,064	0,253
Выдержанная ядровая сосна	30	10,00	10,30	7,73	11,77	1,442	1,201
Свежезаготовленная ядровая сосна	5	10,32	10,21	9,86	10,81	0,163	0,403

Наличие резонансных свойств у ретродревеси́ны сосны закономерно, так как и в свежезаготовленном состоянии она обладает, наравне с древеси́ной ели, достаточно высокой скоростью звукопроводимости вдоль волокон древесины: 5360 и 5630 м/с в среднем для сосны и ели соответственно [11]. Подтверждением резонансных свойств древесины сосны является и тот исторический факт, что в числе первых сделанных Страдивари скрипок есть образцы не только из древесины ели, но и из древесины сосны [3].

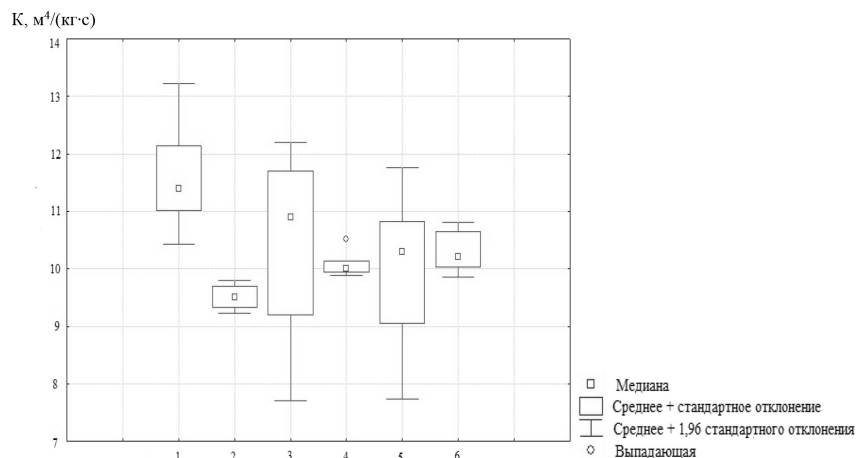


Рис. 6. Диаграмма размаха акустической константы (1, 2 – выдержанная и свежезаготовленная древесина ели соответственно; 3, 4, 5, 6 – выдержанная заболонная, свежезаготовленная заболонная, выдержанная ядровая и свежезаготовленная ядровая древесина сосны соответственно)

Fig. 6. Acoustic constant box-plot: 1 – seasoned spruce wood; 2 – recently harvested spruce wood; 3 – seasoned pine sapwood; 4 – recently harvested pine sapwood; 5 – seasoned pine heartwood; 6 – recently harvested pine heartwood

Таблица 3

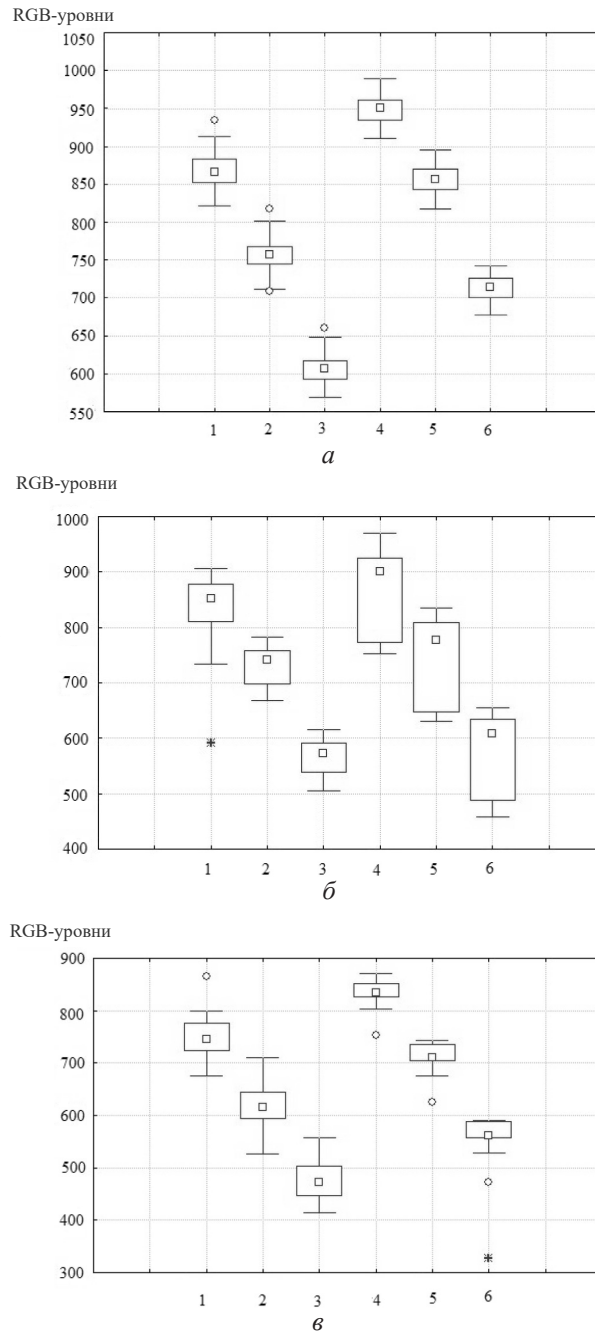
Статистические показатели результатов исследования составляющих цветов (RGB-уровней)

Main statistics on RGB levels

Образец древесины	Составляющая цвета	Объем выборки, шт.	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
Выдержанная ель	Красная	39	0,868	0,867	0,822	0,934	0,641	25
	Зеленая		0,757	0,757	0,709	0,818	0,627	25
	Синяя		0,606	0,606	0,569	0,661	0,471	22
Свежезаготовленная ель	Красная	15	0,951	0,951	0,910	0,990	0,568	24
	Зеленая		0,858	0,856	0,818	0,896	0,539	23
	Синяя		0,714	0,714	0,678	0,743	0,386	20
Выдержанная заболонная сосна	Красная	39	0,839	0,852	0,591	0,907	3,083	56
	Зеленая		0,730	0,741	0,669	0,782	1,198	35
	Синяя		0,569	0,573	0,506	0,616	0,993	32
Свежезаготовленная заболонная сосна	Красная	15	0,866	0,900	0,752	0,970	5,749	76
	Зеленая		0,740	0,778	0,630	0,836	5,966	77
	Синяя		0,572	0,609	0,458	0,655	5,588	75
Выдержанная ядровая сосна	Красная	90	0,749	0,746	0,675	0,865	1,121	34
	Зеленая		0,618	0,616	0,526	0,711	1,183	34
	Синяя		0,473	0,472	0,414	0,557	1,130	34
Свежезаготовленная ядровая сосна	Красная	15	0,834	0,835	0,754	0,871	0,896	30
	Зеленая		0,709	0,710	0,626	0,744	0,925	30
	Синяя		0,546	0,561	0,328	0,591	4,560	68

Рис. 7. Диаграмма размаха уровней RGB: *a* – для выдержанной и свежезаготовленной древесины ели; *b* – для выдержанной и свежезаготовленной заболонной древесины сосны; *в* – для выдержанной и свежезаготовленной ядровой древесины сосны, $\times 10^{-3}$ (1, 2, 3 – красная, зеленая и синяя составляющие цвета выдержанной древесины соответственно; 4, 5, 6 – красная, зеленая и синяя составляющие цвета свежезаготовленной древесины). Условные обозначения – см. рис. 6

Fig. 7. RGB levels box-plot: *a* – for seasoned and recently harvested spruce wood; *b* – for seasoned and recently harvested pine sapwood; *в* – for seasoned and recently harvested pine heartwood, $\times 10^{-3}$ (1, 2, 3 – red, green and blue color components of seasoned wood, respectively; 4, 5, 6 – red, green and blue color components of recently harvested wood, respectively). For the legend, see fig. 6



Из табл. 3 видна существенно более высокая вариативность и, как следствие, большее стандартное отклонение измеренных RGB-уровней свежезаготовленной заболонной древесины сосны по сравнению с выдержанной и остальными образцами. Исследования проводились при одних и тех же условиях, по одной методике и одним средством измерения, поэтому вариативность цвета свежезаготовленной древесины в заболонной части следует отнести к природным факторам (место произрастания, грибное поражение и т. д.). Возможно, на это также оказало влияние различие во времени заготовки и в сроке складирования (хранения) лесоматериалов, из которых были получены об-

разцы. Для установления истинных причин вариативности цвета необходимо проведение отдельных исследований, например работ, подобных проведенной нами, в других регионах с дальнейшим сравнением полученных результатов при учете основных природно-климатических факторов. Кроме того, возможно изучение выдержанной древесины из разных стен сооружения, испытывающих неодинаковое систематическое влияние ветрового, температурно-влажностного режимов и солнечной радиации в зависимости от расположения относительно сторон света.

Измерения цвета выполнены на чистых образцах. Однако известно, что в процессе эксплуатации поверхностные слои древесины меняют цвет. Во-первых, на это влияют естественные факторы (ультрафиолетовые лучи, влага и т. д.). Для установления здесь точных закономерностей необходимо в первую очередь выполнить широкие исследования по установлению степени влияния различных естественных факторов на цвет свежезаготовленной древесины, так как цвета, приобретенные выдержанной древесиной в процессе эксплуатации, базируются на цветовых показателях свежезаготовленной древесины и изменяются относительно их. Во-вторых, изменение цвета древесины происходит вследствие ее дополнительной обработки (покраска, пропитка, облицовка и т. д.) для увеличения срока эксплуатации деревянных конструкций и придания им эстетических свойств. В этом случае проблема экспресс-измерения цвета может быть решена путем отбора образца из деревянного конструктивного элемента или – при необходимости неразрушающего контроля – локального снятия поверхностного слоя древесины определенной толщины ручными или электрическими инструментами.

Акустическая константа. Все образцы выдержанной древесины имеют слабую связь ($r^2 < 0,3$) акустической константы с RGB-уровнями. Для свежезаготовленной древесины уровень корреляции между этими показателями выше и лежит в интервале $r^2 = 0,35 \dots 0,5$.

При установлении цвета образцов в измерительное окно прибора попадало несколько ранних и поздних зон годичных слоев. Следовательно, результаты измерений RGB-уровней представляют усредненные величины по ранней и поздней зонам годичных слоев древесины. Для подтверждения этого предположения на специально подготовленных образцах были проведены исследования цвета отдельно поздней и ранней зон годичных слоев. Например, для одного из образцов содержание составляющих цвета (R/G/B) по ранней зоне годичных слоев составляет 0,812/0,710/0,570, по поздней – 0,692/0,568/ 0,414; а среднее по образцу – 0,740/0,630/0,478. К резонансной древесине ($K \geq 12 \text{ м}^4/(\text{кг} \cdot \text{с})$) было отнесено 5 из 13 (39 %) образцов ели, 3 из 13 (23 %) образцов заболонной части сосны. Остальные образцы показали значительно меньшие значения акустической константы.

Анализируя результаты исследования выдержанной древесины ели, заболонной и ядровой древесины сосны, можно сделать вывод, что древесина ели имеет более высокие значения акустической константы. Меньшие значения у заболонной части древесины сосны и самые низкие – ядровая часть древесины сосны. Для свежезаготовленной древесины прослеживается обратная относительно представленной выше закономерность.

Колориметрические показатели. RGB-уровни для всех исследованных образцов выдержанной древесины ниже по сравнению со свежезаготовленной (рис. 7). В табл. 4 представлена разница по RGB-составляющим цвета для образцов из выдержанной древесины.

Таблица 4

Анализ составляющих цвета выдержанной древесины ели и сосны
Analysis of the color components of seasoned spruce and pine wood

Образец	R	G	B	Среднее
	% от максимального значения			
Древесина ели	91	88	85	88
Заболонная древесина сосны	97	99	100	99
Ядровая древесина сосны	90	87	87	88

Таким образом, с течением времени исследованная древесина ели и сосны стала темнее, а уровни составляющих цвета уменьшились примерно на 12 %.

Изменение RGB-уровней образцов (рис. 7) происходит практически равномерно и одинаково, поэтому можно утверждать, что с течением времени цвет остается тем же, меняется только оттенок – от светлого до темного. Это связано с уменьшением в процессе старения древесины количества целлюлозосодержащих веществ белого цвета, их распадом с образованием гуминовых темноокрашивающих веществ [10]. Схожие процессы протекают при термической модификации древесины [14, 15].

Существенный по величине разброс экспериментальных колориметрических данных свежезаготовленной древесины может свидетельствовать о высокой градации уровней RGB аддитивной цветовой модели у разных образцов, связанной с особенностями биологического и экологического происхождения самой древесины.

Заключение

В данной работе было экспериментально подтверждено, что ретродревесина хвойных пород в элементах древесной конструкции, находящейся на территории Приволжья, отличается от свежезаготовленной древесины лучшими дендроакустическими свойствами.

Выявлена природная вариативность акустических показателей. Не вся древесина ели и сосны, задействованная в старом сооружении, имеет резонансные свойства. По исследуемому объекту лишь 39 % образцов древесины ели и 23 % образцов древесины сосны заболонной части ствола в соответствии с выявленной акустической константой отнесены к резонансной древесине. Следовательно, долгое выдерживание древесины в сооружениях, расположенных на территории Приволжья, способствует сохранению и улучшению резонансных свойств (повышение жесткости и стабильности физико-механических свойств) части древесины.

Колориметрические исследования позволили установить, что цвет древесины вне зависимости от выдержки в рамках одной породы или части дерева (заболонь, ядро) остается постоянным, варьируется лишь его оттенок. У старой ели и ядровой части сосны оттенок древесины темнее вследствие естественных химических процессов, проходящих во время ее эксплуатации. Уровни RGB аддитивной цветовой модели выдержанной древесины ниже в среднем на 12 %, чем у свежезаготовленной.

Полученные данные о корреляции акустической константы и цветовых показателей выдержанной древесины ($r^2 < 0,3$) говорят о слабой взаимосвязи акустических и колориметрических показателей выдержанной древесины. Таким образом, колориметрический метод, применяемый путем прямых измерений на поверхности древесины, является недостаточно точным, особенно в качестве косвенного способа определения резонансных свойств древесины. Однако данное утверждение требует дополнительной проверки посредством углубленных исследований большего количества сооружений, совершенствования методики оценки цветовых показателей отдельно по годичным слоям древесины, использования и других способов определения ее акустических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 719870 СССР, МПК7 В27К5/06. Способ ускоренного старения древесины: № 2605906/29-015: заявл.: 18.04.1978: опубл. 08.03.1980 / И.И. Пищик, А.А. Кудря, Б.А. Янковский, А.И. Расев, С.Я. Шинаев, Г.Д. Коликов, А.П. Колупаев, А.М. Горлов, Ю.М. Яковлев, Б.С. Ремизов.
Pishchik I.I., Kudrya A.A., Yankovskij V.A., Rasev A.I., Shinaev S.Ya., Kolikov G.D., Kolupaev A.P., Gorlov A.M., Yakovlev Yu.M., Remizov B.S. *Method of Accelerated Ageing of Wood*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 719870 A1, 1980. (In Russ.).
2. Андреев Н.Н. О дереве для музыкальных инструментов // Сб. тр. НИИМЦ. 1938. Вып. 1. С. 11–18.
Andreev N.N. Wood for Musical Instruments. *Sbornik trudov NIIMTs*, 1938, iss. 1, pp. 11–18. (In Russ.).
3. Витачек Е.Ф. Очерки по истории изготовления смычковых инструментов. М.: Музыка, 1964. 341 с.
Vitachek E.F. *Essays on the History of Manufacture of Bowed String Instruments*. Moscow, Muzyka Publ., 1964. 341 p. (In Russ.).
4. Кальнини А.И. Связь свойств древесины с условиями произрастания // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1949. Т. 1У. С. 98–101.
Kal'ninsh A.I. Relation of Wood Properties to Growing Conditions. *Trudy Instituta lesa AN SSSR*, 1949, vol. 1U, pp. 98–101. (In Russ.).
5. Ковальчук Л.М., Успенская Н.А., Пьянов А.Н. Восстановление деревянных конструкций зрительного зала Большого театра страны // Деревообраб. пром-сть. 2007. № 3. С. 23–25.
Koval'chuk L.M., Uspenskaya N.A., P'yanov A.N. Restoration of Wooden Structures of the Bolshoi Theater Auditorium. *Derevoobrabativaushaya promishlennost'* = Woodworking industry, 2007, no. 3, pp. 23–25. (In Russ.).
6. Мелехов И.С. Значение типов леса и лесорастительных условий в изучении строения древесины и ее физико-механических свойств // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1949. Т. IV. С. 11–21.
Melekhov I.S. Significance of Forest Types and Forest Site Conditions in the Study of Wood Structure and Its Physical and Mechanical Properties. *Trudy Instituta lesa AN SSSR*, 1949, vol. IV, pp. 11–21. (In Russ.).
7. Никитина Т.А. Технический ресурс ретродревеси́ны хвойных пород в элементах древесных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2021. 146 с.
Nikitina T.A. *Operation Life of Coniferous Wood of Old Structures in the Elements of Wood Structures*: Cand. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2021. 146 p. (In Russ.).
8. Пахарь Г.А. О пригодности русской ели для выработки резонаторов // Лесопромышленник: еженед. журн. лесн. пром-сти и торговли. 1911. № 1, вып. 2. С. 129–131.

Pakhar' G.A. On the Suitability of Russian Spruce for the Production of Resonators. *Lesopromyshlennik*, 1911, no. 1, iss. 2, pp. 129–131. (In Russ.).

9. Пищик И.И. Исследование свойств древесины длительной выдержки как материала для музыкальных инструментов: дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. 222 с.

Pishchik I.I. *Study of the Properties of Long-Aged Wood as a Material for Musical Instruments*: Cand. Eng. Sci. Diss. Moscow, 1973. 222 p. (In Russ.).

10. Пищик И.И. Датирование древесины длительной выдержки неразрушающими методами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 32 с.

Pishchik I.I. *Non-Destructive Dating of Long-Aged Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2005. 32 p. (In Russ.).

11. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. 5-е изд., перераб. и доп. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Ugolev B.N. *Wood Science and Forest Commodity Science*. Moscow, MGUL, 2007. 351 p. (In Russ.).

12. Федюков В.И. Ель резонансная: отбор на корню, выращивание, целевое использование: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. 256 с.

Fedyukov V.I. *Resonance Spruce: Selection on the Root, Cultivation, Target Use*: Monograph. Yoshkar-Ola, VSUT Publ., 2016. 256 p. (In Russ.).

13. Федюков В.И., Салдаева Е.Ю. Резонансная ель для реконструкции Большого театра России // Лесн. хоз-во. 2011. № 2. С. 13–14.

Fedyukov V.I., Saldaeva E.Yu. Resonance Spruce for the Reconstruction of the Bolshoi Theater. *Lesnoye khozyaystvo*, 2011, no. 2, pp. 13–14. (In Russ.).

14. Altgen M. *Impact of Process Conditions in Open and Closed Reactor Systems on the Properties of Thermally Modified Wood*. PhD Dissertation. Göttingen, 2016. 146 p.

15. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Springer, Berlin, 2006. 394 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

16. Fedyukov V.I., Saldaeva E.Y., Chernova M.S., Chernov V.Y. Biomorphology of Spruce Trees as a Diagnostic Attribute for Non-Destructive Selection of Resonant Wood in a Forest. *South-East European Forestry*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 147–153. <https://doi.org/10.15177/seefer.18-11>

17. Froidevaux J., Navi P. Ageing Law of Spruce Wood. *Wood Material Science and Engineering*, vol. 8, iss. 1, pp. 46–52. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.725427>

18. Huber F. *Definition de caracteristiques simples decrivant les arbres et le bois de l'epicea commun (Picea excelsa Link.) et pouvant etre prises en flite pour l'evaluation de la ressource en bois de resonance (station de iherches sur la gualite des bois)*. Champenoux, INRA, CNRF Centre National de Recherches Forestières, 1989. 38 p. (In Fra.).

19. Ille R. Rezonaromi diavo smrku pro mistrovskfl housle. *Drevo*, 1979, no. 4, pp. 303–304. (In Czech).

20. Kránitz K., Deublein M., Niemz P. Determination of Dynamic Elastic Moduli and Shear Moduli of Aged Wood by Means of Ultrasonic Devices. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 925–936. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>

21. Noguchi T., Obataya E., Ando K. Effects of Aging on the Vibrational Properties of Wood. *Journal of Cultural Heritage*, 2012, vol. 13, iss. 3, suppl., pp. S21–S25. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.008>

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

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.082:676.085.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-178-192

**Выделение сульфатного мыла из щелоков
от варки смешанных пород древесины**

Е.В. Старжинская¹, инж.-технолог; ResearcherID: [E-2862-2019](https://orcid.org/0000-0002-4989-264X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4989-264X>

А.М. Кряжев², д-р техн. наук, гл. технолог;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3287-6387>

С.И. Третьяков³, канд. техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-2192-2019](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1783-5349>

А.А. Глуханов³, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAM-4805-2021](https://orcid.org/0000-0002-0775-9613)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0775-9613>

¹ООО «Техсервис», ул. Мельникова, д. 1, г. Новодвинск, Архангельская обл., Россия, 164900; Lesochimik-lena@mail.ru

²ООО «Адвис Плюс», наб. Обводного канала, д. 150, корп. 363, оф. 232, Санкт-Петербург, Россия, 191011; kryazhev@advisplus.com

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.tretyakov@narfu.ru, a.gluhanov@narfu.ru

Поступила в редакцию 15.01.22 / Одобрена после рецензирования 19.04.22 / Принята к печати 22.04.22

Аннотация. На процесс выделения сульфатного мыла из черного щелока влияет большое число факторов: породный состав древесины, физические свойства и состав компонентов щелока. Основы процесса достаточно широко изучены, но влияние некоторых факторов требует дополнительных исследований. Вместе с тем в связи с разнообразием породного состава перерабатываемой древесины и различными условиями варки состав и свойства щелока могут значительно отличаться и выделение мыла на разных предприятиях не всегда подчиняется установленным исследованиями закономерностям. Целью работы стало определение оптимальных параметров для выделения сульфатного мыла из полуупаренного черного щелока от варки смешанных пород древесины, а также подбор расхода добавок, позволяющих увеличить выход сульфатного мыла. Исследование построено на принципах математического моделирования процессов и проведено в лабораторных условиях. Для получения математической модели процесса съема мыла в зависимости от выбранных переменных и определения оптимальных значений параметров процесса использовали метод планированного эксперимента в виде ротатабельного композиционного равномерного плана второго порядка. В ходе эксперимента варьировали следующие факторы: температуру, продолжительность отстаивания мыла и плотность щелока. По итогам эксперимента определены



оптимальные значения этих факторов для выделения сульфатного мыла из щелока, построена математическая модель процесса, найдены оптимальные параметры для эффективного отстаивания сульфатного мыла. Приведение производственных условий съема мыла к оптимальным может увеличить съем мыла с полуупаренных щелоков на 20 %. В результате оценки влияния добавок поверхностно-активных веществ различной природы в черный щелок разной плотности на полноту выделения сульфатного мыла подобраны их оптимальные дозировки, дающие наибольший положительный эффект – прирост съема мыла на 15 %.

Ключевые слова: регенерация сульфатных щелоков, сульфатное мыло, черный щелок, талловое масло, планированный эксперимент, параметры отстаивания, добавки для коагуляции

Для цитирования: Старжинская Е.В., Кряжев А.М., Третьяков С.И., Глуханов А.А. Выделение сульфатного мыла из щелоков от варки смешанных пород древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 178–192. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-178-192>

Original article

Sulphate Soap Separation from Wood Mixture Cooking Black Liquor

*Elena V. Starzhinskaya*¹, Process Engineer; ResearcherID: [E-2862-2019](https://orcid.org/0000-0002-4989-264X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4989-264X>

*Anatoly M. Kryazhev*², Doctor of Engineering, Chief Technologist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3287-6387>

*Sergey I. Tret'yakov*³, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-2192-2019](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1783-5349>

*Anatoliy A. Gluhanov*³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAM-4805-2021](https://orcid.org/0000-0002-0775-9613), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0775-9613>

¹OOO “Tekhservis”, ul. Mel’nikova, 1, Novodvinsk, 164900, Russian Federation;

Lesochimik-lena@mail.ru

²OOO “Advis Plus”, nab. Obvodnogo kanala, 150, korp. 363, of. 232, Saint Petersburg,

191011, Russian Federation; kryazhev@advisplus.com

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy

Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.tret'yakov@narfu.ru[✉],

a.gluhanov@narfu.ru

Received on January 15, 2022 / Approved after reviewing on April 19, 2022 / Accepted on April 22, 2022

Abstract. The sulphate soap separation from black liquor is influenced by a large number of factors: wood species composition, physical properties and composition of liquor components. The bases of the process are widely researched, but the influence of some factors requires additional research. Meanwhile, due to the diversity of the processed wood species composition and different cooking conditions, the composition and properties of the liquor may differ significantly, and the soap separation at different mills does not always follow the patterns established in previous studies. The purpose of this research is to determine the optimal parameters for the sulphate soap separation from semi-steamed black liquor from the mixed wood cooking, as well as the consumption of additives to increase the sulphate soap yield. The research is based on the principles of mathematical modeling of processes and was



carried out in laboratory conditions. We used the method of a planned experiment in the form of a second-order rotatable compositional uniform plan in order to obtain a mathematical model of the soap skimming process, depending on the chosen variables and to determine the optimal values of the process parameters. In the experiment, the following factors were varied: temperature, soap settling time and liquor density. The optimal values of these factors for sulphate soap separation from black liquor were determined, a mathematical model of the process was developed, and the optimal parameters for the effective sulphate soap settling were determined as results of the experiment. Adjusting the soap skimming production conditions to the optimal can increase soap skimming from semi-steamed liquors by 20 %. As a result of evaluating the effect of adding surfactants of different nature to black liquor of different density on the completeness of sulphate soap separation, we have found their optimal dosages, which give the maximum positive effect – an increase in soap yield by 15 %.

Keywords: sulphate liquor regeneration, sulphate soap, black liquor, tall oil, planned experiment, settling parameters, additives for coagulation

For citation: Starzhinskaya E.V., Kryazhev A.M., Tret'yakov S.I., Gluhanov A.A. Sulphate Soap Separation from Wood Mixture Cooking Black Liquor. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 178–192. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-178-192>

Введение

Выделение сульфатного мыла (СМ) из черного щелока (ЧЩ) – это неотъемлемая и необходимая часть регенерации химикатов при производстве сульфатной целлюлозы. От полноты протекания процессов выделения и сбора мыла зависит производительность оборудования для регенерации и даже выход готовой продукции, если имеются ограничения по работе содорегенерационного котла.

По окончании сульфатной варки ЧЩ отделяют от целлюлозной массы. Основной поток промывных вод поступает вместе с отработанным щелоком на выпарку. ЧЩ содержит омыленные экстрактивные вещества, лигнин и другие растворенные органические и минеральные вещества и имеет следующие параметры: плотность 1,03–1,06 г/см³, содержание сухих веществ (СВ) 7–15 %. В процессе концентрирования ЧЩ на выпарной станции создаются условия для выделения СМ путем отстаивания щелока в несколько стадий: после укрепления слабого щелока крепким до плотности 1,08–1,09 г/см³ и после первой очереди упаривания до 1,18–1,20 г/см³ [4, 5].

В основе выделения и сбора СМ лежит процесс мицеллообразования, зависящий от различных сырьевых и технологических факторов. При понижении температуры и отстаивании ЧЩ молекулы смолистых веществ агрегируются в мицеллы и выделяются из ЧЩ, всплывая в виде мыла. Размеры частиц в момент выделения мыла равны 0,3–0,4 мкм. Они очень быстро группируются в хлопья со средним размером 2–60 мкм и затем в более крупные агрегаты, которые, всплывая на поверхность ЧЩ, образуют рыхлую пену плотностью 0,2–0,6 г/см³ [5, 11, 14].

СМ является ценным побочным продуктом, который может быть переработан в талловое масло с целью получения смоляных и жирных кислот, необходимых для различных отраслей промышленности. Съем мыла – не только экономически целесообразный, но и технологически необходимый процесс подготовки щелоков к регенерации: при увеличении плотности щелока более

12–13 кг/м³ возникают нежелательные явления: например, вспенивание щелоков, нагар на трубках выпарных аппаратов, что вызывает отложения буркита (растворимого минерала, состоящего из солей сульфата и карбоната натрия), и продолжительность работы выпарной станции между промывками сокращается [7, 14, 16, 18]. Проблемы, возникающие при регенерации сульфатных щелоков, приводят к дополнительным затратам [16, 21, 22].

При отстаивании в отстойниках и мылоотделителях с ЧЩ можно снять до 60 % СМ, однако на практике удается получать только 40–50 % [4]. Есть различные способы повышения выхода мыла до 60–70 %: введение в ЧЩ катионоактивных или анионоактивных поверхностно-активных веществ (ПАВ) или гидрофобных низкомолекулярных соединений, флоатция, электрофлоатция, окисление ЧЩ, добавка электролитов [9, 10, 12, 15, 16, 19, 20, 23].

Несмотря на большое количество вариантов технических решений, проблема низкого съема мыла остается актуальной. В последние годы появились и успешно применяются добавки для варки древесины, которые положительно влияют на процессы получения целлюлозы, но негативно сказываются на выделении смолистых веществ из ЧЩ. Например, солюбилизаторы – вещества, которые растворяют частички смолы, препятствуя ее налипанию на сетку бумагоделательной машины и размольную аппаратуру, но в то же время затрудняют мицеллообразование, так как при солюбилизации часть смолистых веществ переходит в раствор и в формировании частиц мыла не участвует, образующиеся частицы имеют меньший размер и на их всплывание требуется больше времени [6, 8].

Еще одной причиной ухудшения съема СМ может служить увеличение объемов варки целлюлозы и, соответственно, количества ЧЩ при сохранении прежнего числа баков для отстаивания. В этом случае время на отстаивание сокращается и часть мыла не успевает всплывать на поверхность. Также имеет место смешение щелоков от варки целлюлозы и полуцеллюлозы. Последние характеризуются более низким содержанием сухих веществ и отличаются составом минеральной и органической части от первых, что в свою очередь влияет на конечный состав смеси щелоков и условия выделения мыла.

Исследователями определены оптимальные условия для выделения СМ из ЧЩ [1, 4, 5, 13]. Изучены были преимущественно щелока от варки высокосмолистых пород древесины. В работе [4] пробы щелока получены от варки низкосмолистой древесины – смолистость сырья составляла менее 2 %. Отбор проб производился в холодный период – с ноября по март. Содержание экстрактивных смолистых веществ в сырье в этот период достигает максимума (по данным предприятия). Однако выход мыла на предприятии наблюдался неудовлетворительный.

В последнее время большое распространение получает применение в целях повышения выхода СМ добавок ПАВ различных природы и состава [2, 9, 19]. Для щелоков разных предприятий наиболее эффективными оказываются разные добавки, т. е. для условий конкретного предприятия необходим подбор определенного продукта. В настоящем исследовании проведена оценка влияния на съем СМ добавок нескольких ПАВ-содержащих продуктов из числа ранее себя зарекомендовавших.

Цель исследования – определение оптимальных параметров для выделения СМ из полуупаренного ЧЩ от варки смешанных пород древесины, а также подбор расхода добавок, позволяющих увеличить выход СМ.

Для достижения цели были определены следующие задачи:

разработать полиномиальную модель процесса выделения СМ из полуупаренного ЧЩ от варки смешанных пород древесины путем постановки факторного эксперимента на примере щелоков Архангельского ЦБК;

найти оптимальные значения параметров отстаивания СМ из смешанного полуупаренного ЧЩ, построив поверхности отклика по разработанной полиномиальной модели процесса;

оценить влияние различных добавок (электролиты, ПАВ) на процесс выделения СМ из ЧЩ различной плотности на примере щелоков Архангельского ЦБК;

подобрать оптимальную дозировку добавок для повышения выхода СМ из укрепленных и полуупаренных ЧЩ от варки смешанных пород древесины.

Объекты и методы исследования

Определение оптимальных параметров выделения СМ из полуупаренных ЧЩ смешанных пород древесины. В качестве объекта исследования в планированном эксперименте был взят полуупаренный ЧЩ Архангельского ЦБК от сульфатной варки еловой древесины с примесью ($\approx 10\%$) березовой. Для достижения необходимой концентрации СВ использовали добавку слабого либо плотного ЧЩ. В исходном щелоке определяли содержание СВ, остаточной эффективной щелочи в пересчете на Na_2O ($\text{Ш}_{\text{эфф}}$), плотность, а также содержание остаточного таллового масла ($\text{ТМ}_{\text{ост}}$) [17].

ЧЩ был отобран из производственных линий с 3 точек (табл. 1): слабый щелок до отстаивания, полуупаренный щелок до отстаивания и плотный щелок на сжигание.

Таблица 1

Характеристика исходного ЧЩ Characteristics of the original black liquor

Точка отбора	СВ, %	$\text{Ш}_{\text{эфф}}$, г Na_2O /л	Плотность, г/см ³	$\text{ТМ}_{\text{ост}}$, кг/т а.с.в. ЧЩ*
Слабый	14	2,9	1,046	19,5
Полуупаренный	30	8,6	1,155	13,2
Плотный	58	7,7	1,320	7,7

*Абсолютно сухое вещество ЧЩ.

Исходя из данных табл. 1 по $\text{ТМ}_{\text{ост}}$ на I стадии отстаивания (со слабых щелоков) было снято 32 % от исходного содержания мыла в ЧЩ и 28 % – на II стадии (с полуупаренных щелоков).

Для получения математической модели процесса съема мыла в зависимости от выбранных переменных и определения оптимальных значений параметров выделения СМ из ЧЩ использовали метод планированного эксперимента в виде ротатбельного композиционного униформ-плана второго порядка [3]. В ходе эксперимента варьировали следующие факторы (табл. 2): температуру отстаивания щелока (x_1), его плотность (x_2) и продолжительность отстаивания (x_3).

Таблица 2

Значения и интервалы варьирования факторов эксперимента
The value and intervals of experimental factors variation

Фактор	Значение фактора при уровне					Интервал варьирования
	-1,682	-1	0	1	1,682	
Температура, °С	55	65	80	95	105	15
Плотность, г/см ³	1,143	1,150	1,160	1,170	1,176	10
Продолжительность отстаивания, ч	3,2	3,5	4,0	4,5	4,8	0,5

В качестве выходного параметра Y был выбран выход СМ, %, от его исходного содержания в исследуемом ЧЩ, определяемый по формуле

$$B_{\text{см}} = \frac{TM_0 - TM_1}{TM} \cdot 100,$$

где TM_0 – содержание таллового масла в ЧЩ до съема, кг/т а.с.в. ЧЩ; TM_1 – содержание таллового масла в ЧЩ после съема, кг/т а.с.в. ЧЩ.

Отстаивание СМ проводили в термостате в цилиндрической емкости с нижним сливом. Исследуемый образец щелока доводили до требуемой плотности путем добавления слабого или крепкого щелока. Далее образец нагревали до требуемой температуры, тщательно перемешивали с помощью лопастной мешалки с частотой 500 об./мин и выдерживали определенное время (табл. 3) в термостате при температуре, соответствующей условиям опытов. По истечении заданного времени 200 см³ щелока сливали из нижней части емкости и измеряли в отобранной пробе остаточное содержание таллового масла TM_1 .

Определение эффективности добавок для выделения СМ из щелоков от варки смешанных пород древесины. Чтобы испытать эффективность добавок для выделения СМ из слабого ЧЩ от варки смешанных пород древесины, образцы отбирали из производственных линий щелока Архангельского ЦБК.

В табл. 3 показаны данные о составе ЧЩ до и после съема мыла на I стадии (со слабых щелоков) в производственных условиях без добавок. Выход СМ, найденный по приведенной выше формуле, в пересчете на талловое масло составил 4,5 кг/т а.с.в. ЧЩ, или 31 % от содержания таллового масла в щелоке.

Таблица 3

Характеристики сульфатного щелока, отобранного до и после отстаивания
в баках выпарной станции

Characteristics of sulphate liquor collected before and after settling
in the evaporation station tanks

Точка отбора	Плотность, г/см ³	Щ _{эфф} , г/л	СВ, %	TM _{ост} , кг/т а.с.в. ЧЩ
Слабый ЧЩ (до съема СМ)	1,047	3,1	10,5	14,4
Полуупаренный ЧЩ (после съема мыла*)	1,135	3,5	26,0	10,0

*Параметры полуупаренного щелока здесь и далее приведены после съема мыла со слабых и укрепленных щелоков, но до снятия с полуупаренных щелоков.

В целях проверки эффективности добавок для выделения СМ из полуупаренного ЧЩ от варки смешанных пород древесины образцы отбирали из производственных линий щелока Архангельского ЦБК в 3 точках: укрепленная смесь черного сульфатного щелока от варки хвойной небеленой целлюлозы и нейтрально-сульфитного щелока от варки лиственной полуцеллюлозы, полуупаренная смесь щелоков, упаренная смесь щелоков. Характеристики взятых проб щелока приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики смешанного щелока, отобранного до и после отстаивания в баках выпарной станции

Characteristics of mixed liquor collected before and after settling in the evaporation station tanks

Точка отбора	Плотность, г/см ³	Щ _{эфф} , г/л	СВ, %	ТМ _{ост} , кг/т а.с.в. ЧЩ
Смесь укрепленных щелоков (до съема мыла)	1,097	2,3	18,4	19,8
Полуупаренный щелок (после съема мыла)	1,167	8,6	30,2	13,2
Упаренный щелок (на сжигание)	1,335	14,4	54,7	11,4

Данные из табл. 4 показывают, что в производственных условиях без добавок на I стадии было снято 33 % СМ и 9 % – на II стадии. Общая производительность баков по съему СМ составила 42 % в пересчете на талловое масло.

Хранение отобранных на производстве проб осуществляли в плотно закрытой таре. Перед взятием проб непосредственно для испытаний весь объем ЧЩ нагревали до 90 °С, после чего усредняли пробу перемешиванием в течение 5 мин с частотой 500 об./мин. Далее отбирали 1,5 дм³ вещества, перемешивали в течение 1 мин и делили на 3 пробы по 0,5 дм³ (2 параллельных пробы и 1 холостая). В 2 пробы добавляли химикат в определенном количестве и перемешивали каждую из 3 проб в течение 3 мин при частоте 500 об./мин. Готовую пробу помещали в сосуд с нижним сливом в термостат при температуре 80 °С и выдерживали в течение 4 ч. По прошествии заданного времени отбирали часть ЧЩ через нижнее отверстие в количестве 200 см³ и определяли в нем остаточное содержание таллового масла, эффективной щелочи, сухих веществ и плотность [17, 18].

Эффективность добавок оценивали по выходу СМ в пересчете на талловое масло по приведенной выше формуле.

Результаты исследования и их обсуждение

Оптимальные параметры выделения СМ из полуупаренных ЧЩ смешанных пород древесины. Результаты проведенного факторного эксперимента использовали для расчета коэффициентов уравнения регрессии и разработки полиномиальной модели, связывающей значения выходных параметров (полученные характеристики) с условиями их получения (условия опытов).

Уравнение регрессии для полуупаренного ЧЩ:

$$Y = 19,66 - 3,09x_1 + 1,97x_2 + 2,53x_3 + 4,20x_2x_3.$$

В соответствии с уравнением в установленном интервале варьирования большее влияние на выделение мыла оказывает температура, причем ее влияние отрицательно, продолжительность и плотность воздействуют на процесс в меньшей степени. Положительный знак при коэффициенте b_{23} и его высокое значение, равное 4,20, указывают на значительное влияние фактора x_2 на отклик и усиление этого влияния при увеличении уровня фактора x_3 . Применительно к процессу выделения СМ можно сказать, что для повышения его выхода необходимо снижать температуру, а плотность и продолжительность увеличивать, причем чем больше плотность, тем больше продолжительность отстаивания.

Значимость коэффициентов оценивали по критерию Стьюдента. Расчетное значение критерия Фишера составило 2,44, что не превышает критического значения $F_{кр} = 4,74$ ($f_2 = 5; f_1 = 10; \alpha = 0,05$), т. е. уравнение можно считать математической моделью процесса выделения СМ из полуупаренного ЧЩ [3].

По полученной модели построены поверхности отклика (рис. 1) для выделения мыла, при этом температура была зафиксирована на значении, соответствующем центру плана, продолжительность – на значении α и плотность – на значении 1.

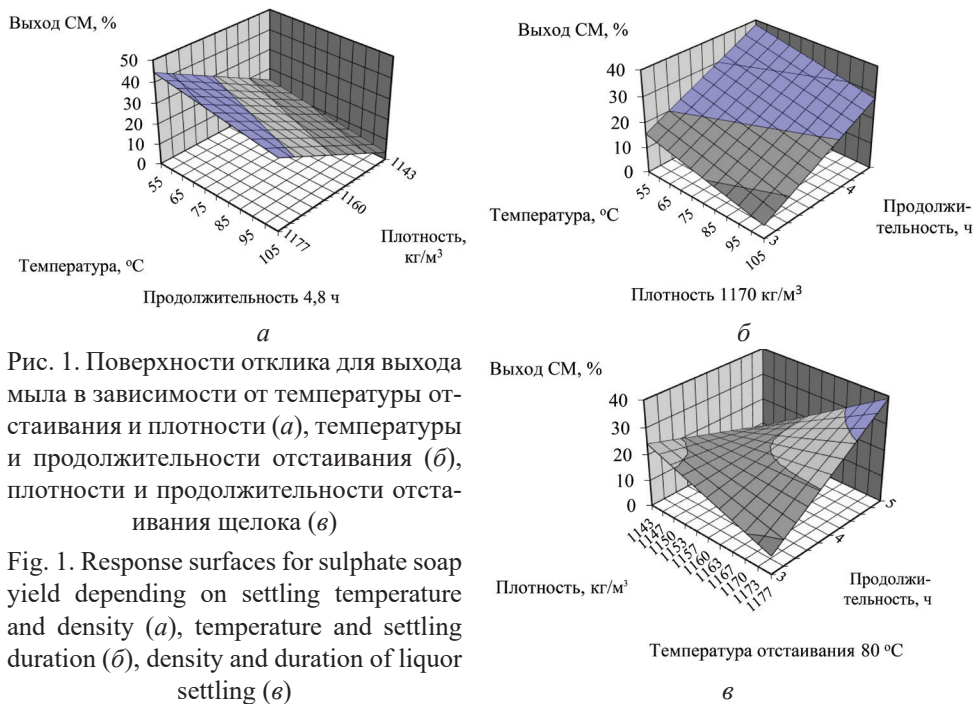


Рис. 1. Поверхности отклика для выхода мыла в зависимости от температуры отстаивания и плотности (а), температуры и продолжительности отстаивания (б), плотности и продолжительности отстаивания щелока (в)

Fig. 1. Response surfaces for sulphate soap yield depending on settling temperature and density (a), temperature and settling duration (б), density and duration of liquor settling (в)

Выявлены следующие закономерности. При продолжительности отстаивания 4,8 ч выход мыла увеличится при плотности 1160 кг/м³ и более. Температура отстаивания может варьироваться, при этом ее повышение требует увеличения плотности ЧЩ (рис. 1, а). При 105 °C плотность необходимо поддерживать на уровне не ниже 1,173 г/см³. При такой достаточно высокой плотности мицеллы мыла хорошо агрегируются, снижение температуры также способствует лучшей коагуляции частиц мыла, но вместе с тем увеличивается вязкость щелока, что не способствует быстрому всплыванию агрегатов.

При плотности 1,170 г/см³ с ростом температуры увеличивается время на отстаивание. Для достижения выхода более 30 % при температуре 95 °С необходимо, чтобы время отстаивания составило не менее 4,6 ч (рис 1, б), при температуре 55 °С потребуется 4,1 ч. Повышение температуры увеличивает время отстаивания, так как растёт скорость поступательного и колебательного движения молекул, что в свою очередь не способствует коагуляции мыла.

При температуре отстаивания 80 °С (рис. 1, в) на выделении мыла положительно сказывается рост плотности от 1,167 г/см³, время отстаивания при этом составит больше 5 ч. Увеличение плотности до 1,173 г/см³ снижает время отстаивания до 4,6 ч. Повышение плотности способствует сближению частиц, поэтому они быстрее коагулируют и всплывают, при этом уменьшается время отстаивания щелока.

В производственных условиях максимальный выход СМ из полуупаренного ЧЩ составил 28 % от исходного содержания СМ и был получен при следующих условиях выделения СМ: плотность ЧЩ – 1,157 г/см³, температура и продолжительность отстаивания – 85 °С и 5–12 ч соответственно. Выход СМ из полуупаренного ЧЩ в лабораторном эксперименте больше на 20 %, чем выход мыла в производственных условиях. Исходя из технологических условий, температуру щелока нежелательно опускать ниже 80 °С.

Оптимальными условиями для отстаивания полуупаренного ЧЩ от варки смешанных пород древесины можно считать температуру 80–85 °С, плотность 1,167–1,170 г/см³, продолжительность отстаивания при этом составит не менее 5 ч, максимальная продолжительность в ходе эксперимента не установлена. Полученные оптимальные параметры отстаивания подтверждают результаты исследований других авторов, однако съём мыла по-прежнему неудовлетворительный. В щелоке остается значительное количество коллоидного и молекулярно-растворенного мыла, извлечь которое можно путем использования добавок.

Определение эффективности добавок для выделения СМ из щелоков от варки смешанных пород древесины. Во второй части исследования проверяли эффективность воздействия различных ПАВ и электролитов на выход СМ из черных и смешанных щелоков различной плотности. Положительное действие добавок для выделения СМ связано с понижением ζ-потенциала коллоидных частиц мыла и их флокуляцией.

Для увеличения выхода мыла из слабого щелока (см. табл. 3) были испытаны добавки Nalco 74-418 – неионогенное ПАВ, Gradochem-100 – комбинированная добавка и Gradochem-200 – дестабилизатор эмульсии мыла. Испытания проводили на слабом щелоке, как это рекомендовано производителями добавок. Расход варьировался от 30 до 60 г/м³. Результаты представлены в табл. 5 и на рис. 2.

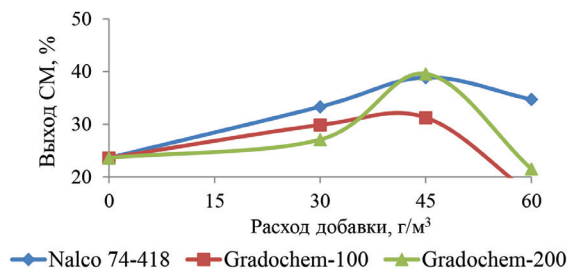
Таблица 5

Содержание остаточного таллового масла до и после отстаивания слабого щелока и отстаивания с добавками, кг/т а.с.в. ЧЩ

The residual tall oil content before and after settling of weak liquor and settling with additives, kg/t of black liquor absolute dry matter

До отстаивания	После отстаивания без добавки	После применения добавки								
		Nalco 74-418			Gradochem-100			Gradochem-200		
		при расходе добавки, г/м ³								
		30	45	60	30	45	60	30	45	60
14,4	11	9,6	8,8	9,4	10,1	9,9	12	10,5	8,7	11,3

Рис. 2. Сравнение добавок для увеличения съема мыла
Fig. 2. Comparison of additives to increase sulphate soap yield



В лабораторных условиях все добавки положительно влияют на съем мыла. Отстаивание без химиката позволяет снять 24 % СМ от его исходного содержания. При использовании добавок Nalco74-418 и Gradochem-200 выход мыла немного больше, чем при использовании Gradochem-100. Добавка Nalco 74-418 хорошо работает при всех дозировках, максимальный выход мыла – 39 % – был получен при расходе химиката 45 г/м³. Gradochem-200 при расходе 45 г/м³ также показал хороший результат – 31 % снятого мыла. С помощью добавок со слабых щелочей можно дополнительно получить 7–15 % СМ в пересчете на талловое масло на I стадии съема. Эти же добавки были протестированы на полуупаренном щелоке при оптимальной дозировке 45 г/м³. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

Содержание остаточного таллового масла до и после отстаивания полуупаренного щелока и отстаивания с добавками, кг/т а.с.в. ЧЩ
The residual tall oil content before and after settling of semi-steamed liquor and settling with additives, kg/t of black liquor absolute dry matter

До отстаивания	После отстаивания без добавки	После применения добавки	
		Nalco 74-418	Gradochem-200
10,0	9,9	8,6	7,7

По данным табл. 6 видно, что добавки позволяют снять большее количество мыла по сравнению с обычным отстаиванием. Использование добавок Nalco 74-418 и Gradochem-200 позволило увеличить выход соответственно на 9 и 15 % от исходного содержания СМ в ЧЩ (рис. 3).

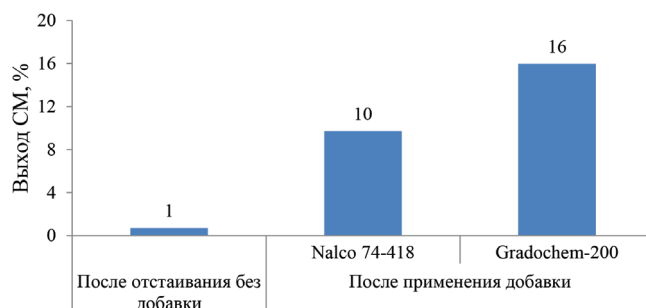


Рис. 3. Выход СМ из полуупаренного ЧЩ

Fig. 3. Sulphate soap yield from semi-steamed black liquor

Далее испытывали смесь слабого сульфатного и нейтрально-сульфитного щелоков от варки хвойной небеленой целлюлозы и полуупаренной смеси сульфатного и нейтрально-сульфитного щелоков от варки хвойной небеленой целлюлозы (см. табл. 4). Смесь имеет низкую концентрацию щелочи. Снижение концентрации происходит вследствие смешения сульфатного щелока, который после варки содержит остаточной эффективной щелочи 2,3 г/л в пересчете на Na_2O , с нейтрально-сульфитным, не содержащим активной щелочи, так как процесс не предполагает ее использования. Растворимость мыла в щелоке минимальна при содержании эффективной щелочи 8–10 г/л [17], соответственно, чем ближе значение к этому диапазону, тем лучше съем мыла.

В данной серии опытов нами предложено повышать концентрацию электролитов в слабом щелоке путем добавления NaOH , Na_2SO_4 и упаренного ЧЩ, который содержит больше электролитов, в том числе NaOH .

Электролит добавляли в количестве 3, 5 и 7 г/л. NaOH и упаренный ЧЩ вводили в виде растворов, Na_2SO_4 – в сухом виде. Результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7

Влияние добавки электролита на остаточное содержание таллового масла в смеси щелоков, кг/т а.с.в. ЧЩ

The effect of electrolyte addition on the tall oil residual content in the liquor mixture, kg/t of black liquor absolute dry matter

До отстаивания	После отстаивания без добавки	После применения добавки							
		NaOH			Na_2SO_4			Упаренный ЧЩ	
		при расходе электролита (в ед. Na_2O), г/л							
		3	5	7	3	5	7	3	5
19,8	11,5±0,5	10,8	10,5	10,5	11,4	9,7	9,6	9,8	7,7

Добавка электролитов в виде NaOH , Na_2SO_4 и упаренного ЧЩ положительно повлияла на выход мыла (рис. 4). С ростом концентрации выход СМ повышался. Применение сульфата натрия и гидроксида натрия эффективно при расходе 3 и 5 г/л, при увеличении расхода электролитов до 7 г/л значительного роста выхода не наблюдалось. Добавка упаренного ЧЩ также положительно отразилась на выходе СМ из ЧЩ.

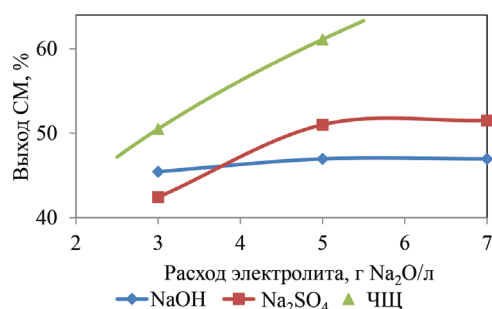


Рис. 4. Влияние добавки электролита на выход СМ

Fig. 4. The effect of electrolyte addition on the sulphate soap yield

Съем мыла со смешанного укрепленного щелока можно увеличить на 14 % от исходного содержания при использовании гидроксида натрия в количестве 5 г/л щелока. Сульфат натрия при том же расходе позволяет повысить выход мыла на 18 % – добавка электролитов в виде упаренного ЧЩ в количестве 5 г/л – на 28 % от исходного содержания.

Полуупаренный ЧЩ содержит достаточное количество остаточной эффективной щелочи, после всплытия крупных мицелл в щелоке остаются коллоидно-растворенные мыла. Для увеличения съема СМ с полуупаренного ЧЩ испытали добавку фирмы «Релен», которая представляет собой водный раствор анионных ПАВ. Результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты испытания химиката «Релен» на полуупаренном смешанном щелоке.

Содержание таллового масла, кг/т а.с.в. ЧЩ

The test results of the chemical “Relen” with semi-steamed mixed liquor.

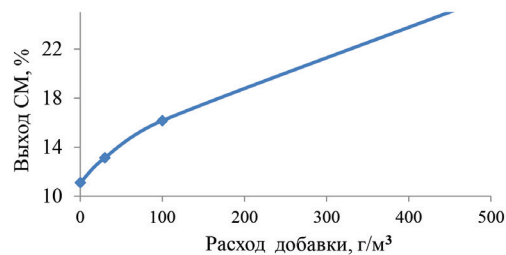
The tall oil content, kg/t of black liquor absolute dry matter

До отстаивания	После отстаивания	После применения добавки в количестве, г/м ³		
		30	100	500
13,2±0,2	11,0±0,2	10,6±0,3	10±1	8±0,5

Применение добавки «Релен» показало хорошие результаты. Увеличение расхода добавки повышает выход СМ. Максимальный выход мыла (рис. 5) наблюдался при расходе добавки 500 г/м³ и составил 26 %, что на 15 % больше, чем при обычном отстаивании.

Рис. 5. Влияние добавки «Релен» на выход СМ

Fig. 5. The effect of “Relen” addition on the sulphate soap yield



Выводы

1. В ходе эксперимента разработана полиномиальная модель процесса выделения сульфатного мыла из полуупаренного черного щелока от варки смешанных пород древесины.

2. Определены оптимальные условия для выделения мыла из полуупаренного черного щелока: продолжительность отстаивания – 4,8–5 ч, плотность щелока – 1,160–1,173 г/см³, температура отстаивания – 80–85 °С.

3. Добавки химикатов Nalco 74-418 и Gradochem-200 при дозировке 45 г/м³ позволяют увеличить выход сульфатного мыла из слабого черного щелока на 9–15 %.

4. При низком содержании электролитов добавка NaOH, Na₂SO₄ и плотного черного щелока к укрепленным смешанным щелокам увеличивает съем сульфатного мыла (для исследованных щелоков – соответственно на 14, 18 и 28 % от содержания мыла в исходном черном щелоке).

5. Добавка химиката «Релен» к полуупаренным смешанным щелокам в количестве от 30 до 500 г/м³ также позволяет увеличить выход СМ от его исходного содержания в щелоке на 2–15 %. Причем выход мыла возрастает пропорционально повышению расхода химиката.

6. Результаты эксперимента могут быть применены предприятиями, производящими сульфатную целлюлозу из смешанных низкосмолистых пород

древесины и имеющими проблемы недостаточности извлечения сульфатного мыла. Величина достигнутых эффектов в производственных условиях может отличаться от значений, полученных в данном лабораторном исследовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алферова Л.А. Выделение сульфатного мыла из черных щелоков // Лесохимия и подсоска. 1972. № 2. С. 16–17.

Alferova L.A. Sulphate Soap Separation from Black Liquors. *Lesokhimiya i podsochka*, 1972, no. 2, pp. 16–17. (In Russ.).

2. Андранович О.С., Демьянцева Е.Ю., Филиппов А.П., Смит Р.А. Деэмульгирование сульфатного мыла при введении неионогенного поверхностно-активного вещества // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 224–232.

Andranovich O.S., Demiantseva E.Yu., Filippov A.P., Smit R.A. Sulphate Soap Demulsifying with Addition of Non-Ionic Surfactant. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 6, pp. 224–232. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.224>

3. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Третьяков С.И., Жабин В.И. Расчеты в планировании эксперимента. Архангельск: АГТУ, 2008. 124 с.

Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Tret'yakov S.I., Zhabin V.I. *Calculations in Planning an Experiment*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 124 p. (In Russ.).

4. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М., Соколова А.А., Филиппов Б.С., Мариев А.А., Тиранов П.П., Третьяков С.И., Новозhilов Е.В., Гельфанд Е.Д., Селянина Л.И., Борисов Г.В. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с.

Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M., Sokolova A.A., Filippov B.S., Mariyev A.A., Tiranov P.P., Tret'yakov S.I., Novozhilov E.V., Gelfand E.D., Selyanina L.I., Borisov G.V. *Processing of Sulphate and Sulfite Liquors*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p. (In Russ.).

5. Головин А.И., Трофимов А.Н., Узлов Г.А., Жукова И.П., Киприанов А.И., Прохорчук Т.И., Ковалев В.Е. Лесохимические продукты сульфатцеллюлозного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 288 с.

Golovin A.I., Trofimov A.N., Uzlov G.A., Zhukova I.P., Kiprianov A.I., Prokhorchuk T.I., Kovalev V.E. *Wood Chemical Products of Sulphate Pulp Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 288 p. (In Russ.).

6. Личутина Т.Ф., Сажинов А.А., Краснова О.М. Совершенствование технологии выделения сульфатного мыла с применением поверхностно-активных веществ // Гидролиз. и лесохим. пром-сть. 1985. № 4. С. 18–20.

Lichutina T.F., Sazhinov A.A., Krasnova O.M. Improving the Sulphate Soap Separation Technology with the Use of Surfactants. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'*, 1985, no. 4, pp. 18–20. (In Russ.).

7. Маслов В.А., Колобов Ю.В., Личутина Т.Ф. и др. Потери компонентов древесины в процессе открытого кучевого хранения щепы // Бумаж. пром-сть. 1974. № 3. С. 14–15.

Maslov V.A., Kolobov Yu.V., Lichutina T.F. et al. Loss of Wood Components during Open Pile Storage of Wood Chips. *Bumazhnaya promyshlennost'*, 1974, no. 3, pp. 14–15. (In Russ.).

8. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. II / под ред. В.А. Столярова. СПб.: Профессионал, 2005. 1142 с.

New Handbook of Chemist and Technologist. Raw Materials and Products of the Industry of Organic and Inorganic Substances. Part II. Ed by V.A. Stolyarov. Saint Petersburg, Professional Publ., 2005. 1142 p. (In Russ.).

9. Парфенова А.В., Демьянцева Е.Ю. Коагуляция органических веществ древесины в отработанных щелоках целлюлозно-бумажного производства // Инновационные технологии в науке и образовании: сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 19–21.

Parfenova A.V., Demyantseva E.Yu. Coagulation of Wood Organic Substances in Waste Liquors of Pulp and Paper Production. *Innovative Technologies in Science and Education: Collection of Academic Papers of the 10th International Scientific and Practical Conference.* Penza, Nauka i Prosveshcheniye Publ., 2019, pp. 19–21. (In Russ.).

10. Патент 2570710 С2 РФ, МПК С11В 13/02. Способ выделения концентрированных порций продукта, состоящего из мыла таллового масла, из смеси черного щелока и продукта, состоящего из мыла таллового масла, и устройства для этого концентрированного продукта, состоящего из мыла таллового масла, и/или отделенного черного щелока: № 2012131912/13: заявл. 28.12.2010; опубл. 10.12.2015 / А.Г. Хофстедт (Швеция).

Khofstedt A.G. *Extraction of Concentrated Portions of Product Consisting of Tall Oil Soap, of Mix of Black Alkali Liquor and Product Consisting of Tall Oil Soap, and Device for This Concentrated Product Consisting of Tall Oil Soap and/or Separated Black Alkali Liquor.* Patent RF no. RU 2 570 710 C2, 2011. (In Russ.).

11. Полубояринов О.И., Зарудная Г.И. Лесосырьевая база России // Технология целлюлозно-бумажного производства. Т. 1, ч. 1. СПб.: Политехника, 2002. С. 13–25.

Poluboyarinov O.I., Zarudnaya G.I. Forest Raw Material Base of Russia. *Technology of Pulp and Paper Production.* Vol. 1, part 1. Saint Petersburg, Politekhnik Publ., 2002, pp. 13–25. (In Russ.).

12. Свиридов В.В., Гомзигов А.И., Тагильцева В.С., Скрялев Л.Д., Узлов Г.А. Влияние технологических факторов на выделение сульфатного мыла из щелоков // Бумаж. пром-сть. 1980. № 1. С. 22–24.

Sviridov V.V., Gomzikov A.I., Tagil'tseva V.S., Skrylev L.D., Uzlov G.A. Influence of Technological Factors on Sulphate Soap Separation from Liquors. *Bumazhnaya promyshlennost'*, 1980, no. 1, pp. 22–24. (In Russ.).

13. Селянина Л.И., Селянина С.Б. Переработка низкокачественного сульфатного мыла: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 208 с.

Selyanina L.I., Selyanina S.B. *Recycling of Low-Quality Sulphate Soap*: Monograph. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 208 p. (In Russ.).

14. Фейгус Э.И., Храменков Б.А. Сбор сульфатного мыла и работа выпарных станций в условиях замкнутой системы водопотребления // Целлюлоза. Бумага. Картон. 1994. Вып. 11-12. С. 16–18.

Feigus E.I., Khramenkov B.A. Collection of Sulphate Soap and Operation of Evaporation Plants in a Closed System Water Consumption. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 1994, iss. 11-12, pp. 16–18. (In Russ.).

15. Харламова А.Н., Демьянцева Е.Ю. Исследование смешанных мицелл неионогенного и катионного ПАВ в водных растворах // Вестн. молодых ученых СПГУТД. 2018. № 1. С. 8–12.

Kharlamova A.N., Demyantseva E.Yu. Investigation of Mixed Micelles of Nonionic and Cation Surfactants in Aqueous Solutions. *Vestnik molodykh uchenykh SPGUTD*, 2018, no. 1, pp. 8–12. (In Russ.).

16. Цветков А.А., Богданович Н.И., Селянина С.Б. Извлечение сульфатного мыла, как способ увеличения эффективности работы предприятия ЦБП // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2014. № 7. С. 58–61.

Tsvetkov A.A., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B. Sulphate Soap Extraction as a Way to Increase the Efficiency of the Pulp and Paper Enterprise. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2014, no. 7, pp. 58–61. (In Russ.).

17. *Analysis of Soda and Sulfate Black Liquor*. Test Method T 625 CM-1985. TAPPI, 1985. 7 p.

18. Foran C.D. *Tall Oil Soap Recovery*. Savannah, Arizona Chemical Company, 2008. 49 p.

19. Pirttinen E., Stenius P., Vuorinen T., Kovasin K., Ala-Kaila K. A New Method to Improve Soap Separation in Black Liquor by Adding Extracted Neutrals of Tall Oil. *Proceedings of the Engineering, Pulping, and PCE&I Conference*. Atlanta, GA, TAPPI, 2004.

20. Svarz J.J., Duggirala P.Y., Worley G.E. *Additives for Increasing the Separation Yield of Tall Oil Soap from Black Liquors*. Patent US no. US 7,504,478 B2, 2009.

21. Tikka P. *Chemical Pulping. Part 2. Recovery of Chemicals and Energy*. Finland, Paperi ja Puu Oy, 2008. 383 p.

22. Tikka P., Kovasin K., Laxen T. Solving Soap and Turpentine Related Process Problems in Softwood Kraft Mills. *Pulp & Paper Canada*, 2002, vol. 103(6), pp. T149–T154.

23. Tourtellotte J.F. *Recovery of Soap Fraction from Recycle Impregnating Cooking Liquor in a Continuous Rapid Pulping System*. Patent US no. 3,562,096, 1971.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

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



Научная статья

УДК 57.045

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-193-205

Радиальный рост сосны обыкновенной в условиях северной тайги

Н.А. Неверов[✉], канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

З.Б. Чистова, канд. геол.-минер. наук; *ResearcherID*: [AAO-6130-2021](https://orcid.org/0000-0003-2827-0478),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2827-0478>

А.Л. Минеев, канд. геол.-минер. наук; *ResearcherID*: [R-9161-2018](https://orcid.org/0000-0003-3024-6928),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3024-6928>

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; na-neverov@yandex.ru[✉], zchistova@yandex.ru, mineew.al@gmail.com

Поступила в редакцию 13.01.21 / Одобрена после рецензирования 20.04.21 / Принята к печати 22.04.21

Аннотация. Оценено влияние дневных и ночных метеорологических параметров (температуры воздуха, точки росы, относительной влажности воздуха, скорости ветра и количества осадков) на радиальный рост сосны в северной подзоне тайги в черничном, брусничном и кустарничково-сфагновом типах леса. Исследование проведено в Архангельской области вблизи пос. Пинега (подзона северной тайги). Пробные участки были заложены на площадях с разными типами леса, характерными для данной территории. Отобрано 63 керн с 7 наиболее представительных участков. Метеорологические параметры за период 2008–2015 гг. получены цифровой метеостанцией WMR918 H (Huger GmbH, Германия), расположенной на площади исследования и работающей в мониторинговом режиме. В сосняке черничном выявлена высокая корреляция радиального роста с температурами воздуха и точки росы июля (0,80...0,88) и еще более высокая – с ночными значениями этих показателей (0,90). Со скоростью ветра мая, июня и сентября установлена как прямая, так и обратная корреляция: 0,77...0,78 и –0,79...–0,84. На одной из пробных площадей с осадками мая и июня обнаружена обратная корреляция. В сосняке брусничном выявлены сходные с черничным зависимости. В кустарничково-сфагновом типе установлена корреляция с относительной влажностью воздуха. Прямые и обратные связи радиального роста со скоростью ветра свидетельствуют о его различном влиянии на физиологические процессы в листовой пластинке посредством ее охлаждения и усиления транспирации. Значительная вариабельность корреляции в черничном типе, вероятно, вызвана различием в таксационных показателях исследуемых древостоев, а также может являться особенностью сосняков черничных. В целом сосна в черничном, брусничном и кустарничково-сфагновом типах леса имеет сходную реакцию на изменчивость метеофакторов, основным из которых является температурный режим воздуха.

Ключевые слова: сосна, радиальный рост, радиальный рост сосны, метеопараметры, температура воздуха, температура точки росы, осадки, скорость ветра, сосняк черничный, сосняк брусничный, сосняк кустарничково-сфагновый, Пинега, северная тайга

Благодарности: Исследование проведено в ходе выполнения госзадания № 122011300380-5 Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лавёрова УрО РАН.

Для цитирования: Неверов Н.А., Чистова З.Б., Минеев А.Л. Радиальный рост сосны обыкновенной в условиях северной тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 193–205. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-193-205>

Original article

Radial Growth of Scots Pine in the Northern Taiga

Nikolay A. Neverov[✉], Candidate of Agriculture; ResearcherID: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

Zinaida B. Chistova, Candidate of Geology and Mineralogy;
ResearcherID: [AAO-6130-2021](https://orcid.org/0000-0003-2827-0478), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2827-0478>

Alexandr L. Mineev, Candidate of Geology and Mineralogy; ResearcherID: [R-9161-2018](https://orcid.org/0000-0003-3024-6928),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3024-6928>

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; na-neverov@yandex.ru[✉], mineew.al@gmail.com, zchistova@yandex.ru

Received on January 13, 2021 / Approved after reviewing on April 20, 2021 / Accepted on April 22, 2021

Abstract. The research aims at assessing the influence of daytime and nighttime meteorological parameters (air temperature, dew point, relative air humidity, wind velocity and amount of precipitation) on the pine radial growth in the northern taiga subzone in blueberry, lingonberry and bush-sphagnum forest types. The study was carried out in the Arkhangelsk region near the Pinea settlement (northern taiga subzone). Sample plots were laid out in areas with different forest types specific for this territory. A total of 63 core samples were taken from 7 of the most representative sites. Meteorological parameters for 2008–2015 were collected by a digital weather station WMR918 H (Huger GmbH, Germany) located in the research area and operating in the monitoring mode. In blueberry pine forest, we have detected a high correlation of radial growth with air temperature and dew point in July (0.80–0.88), and even higher correlation with the night values of these parameters (0.90). Both direct and inverse correlations were found with wind velocities in May, June, and September: from 0.77 to 0.78 and from –0.84 to –0.79. An inverse correlation was observed in one of the sample plots with precipitation of May and June. Dependencies similar to the blueberry pine forest have been found in the lingonberry pine forest. A correlation with relative air humidity was found in the shrub-sphagnum forest type. Direct and inverse correlations of radial growth with wind velocity indicate its different influence on physiological processes in the leaf blade by cooling it and enhancing transpiration. Significant variability in the correlation in the blueberry forest type is probably caused by differences in the inventory parameters of the studied stands, and may also be a feature of blueberry pine forests. Generally, pine in the blueberry, lingonberry and shrub-sphagnum forest types has a similar response to the variability of meteorological factors, the main of which is the air temperature regime.



Keywords: pine, radial growth, pine radial growth, meteorological parameters, air temperature, dew point temperature, precipitation, wind velocity, blueberry pine forest, lingonberry pine forest, bush-sphagnum pine forest, Pinega, northern taiga

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment No. 122011300380-5 of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Neverov N.A., Chistova Z.B., Mineev A.L. Radial Growth of Scots Pine in the Northern Taiga. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 193–205. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-193-205>

Введение

Одной из основных лесобразующих древесных пород таежной зоны европейской части России является сосна обыкновенная. Она выполняет важные экологические функции и дает высококачественную древесину. Однако в результате интенсивных рубок ценные сосновые леса истощаются с большой скоростью. Таким образом, актуальными становятся вопросы повышения продуктивности и устойчивости сосновых древостоев, их рационального использования. Для этого необходимо всестороннее рассмотрение процессов формирования древесины сосны [5].

Ранняя и поздняя древесина отражают условия разных промежутков вегетационного периода, неодинаково откликаясь на изменения в окружающей среде [3, 16, 18]. Радиальный рост особенно чувствителен к изменениям температуры воздуха и влажности почвы [10]. Наиболее благоприятные температуры воздуха для роста хвойных в северной и средней тайге в течение вегетационного периода составляют от 13 до 20 °С. Температуры за пределами этого диапазона вызывают снижение годового прироста. Влияние осадков менее существенно, чем тепловой режим [9].

Для северной подзоны тайги и севера Евразии от Урала до Чукотки выявлено значительное влияние июньской температуры на радиальный рост сосен [7, 9]. Аналогичные закономерности получены для сосен, произрастающих вблизи пос. Пинега (64°35' с. ш. 43°10' в. д.). Обнаружена высокая корреляция радиального роста сосны с весенне-летними температурами текущего вегетационного периода и слабая – с зимними температурами и осадками поздней зимы/ранней весны [14]. В другом масштабном исследовании рассмотрены пробные площади, расположенные в 50–80 км к югу от пос. Пинега. Радиальный рост сосны коррелирует с температурами июня–июля и осадками [13].

В северной части Скандинавии (Норвегия) июльская температура и количество осадков в мае являются фактором, в значительной мере влияющим на радиальный рост сосны [22]. Осадки мая оказывают существенное воздействие на радиальный рост при раннем таянии снега и значительном прогреве почвы [15]. В северной Финляндии температура воздуха влияет на радиальный рост [26]. В лесах Финляндии с севера на юг рост деревьев становится менее подверженным влиянию температур вегетационного периода и более подверженным влиянию, например, осадков [20]. То же самое характерно для западного склона Уральских гор [27].

Подобные тенденции наблюдаются и в подзоне средней тайги Центральной Сибири: обнаружена сильная корреляция между радиальным ростом сосны и июньской температурой [6], а в Республике Коми – с июльской температурой [21]. В Восточной Сибири (Центральная Якутия) на многолетнемерзлых грунтах температуры воздуха и почвы, количество осадков за вегетационный период влияют на радиальный рост сосны [24]. В лесостепных условиях Хакасии [1, 2] повышенные температуры вегетационного периода отрицательно сказываются на радиальном росте; на Южном Урале отмечена высокая корреляция прироста с осадками в мае, июне и июле текущего вегетационного периода [4].

Температура воздуха непосредственно влияет на процесс формирования клеточной стенки древесины сосны, а именно на ферментативную активность, скорость синтеза вещества клеточной стенки, наличие субстрата, транспорт гормонов, транслокацию вещества с мембраны в клеточные стенки [10]. Высокие температуры (>26 °C) приводят к значительному снижению скорости радиального роста за счет уменьшения количества ассимилятов, которые начинают расходоваться на дыхание, и активации ферментов, ответственных за расщепление протопласта [28]. Смачивание листьев туманом и росой, без заметного увеличения влажности почвы, особенно ночью, положительно влияет на водный баланс у хвойных [11, 19, 25]. Низкая скорость радиального роста может быть обусловлена высоким уровнем грунтовых вод, который снижает питательную ценность почвы и ухудшает дыхание корней [17].

В Литве [12] и северной Шотландии [23] в условиях кустарничково-сфагнового типа леса не выявлена корреляция радиального роста с температурой воздуха. Существенной корреляции с осадками также не обнаружено.

Цель исследования – оценить влияние дневных и ночных метеорологических параметров (температуры воздуха и точки росы, относительной влажности воздуха, скорости ветра, количества осадков) на радиальный рост сосны обыкновенной в северной тайге в различных условиях произрастания.

Объекты и методы исследования

Район исследований расположен в северной подзоне тайги, в Пинежском районе Архангельской области, с юго-западной стороны от пос. Пинега.

В Архангельской области северная тайга занимает 8 млн га: ельники – 70,4 % лесной площади [10]; сосновые леса – 20 %. Представлены следующие типы сосновых лесов, %: 30,5 – сфагновые, 21,2 – черничные, 16,9 – лишайниковые, 15,4 – брусничные, 16 – прочие [7].

Среднегодовая температура воздуха составляет от –1,3 до 0,7 °C. Среднегодовое количество осадков – 550 мм (350–900 мм). Безморозный период длится 80–115 дней. Средняя продолжительность периода с положительной температурой почвы – 71 день [8].

Предметом исследования является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). В 2016 г. заложено 7 пробных площадей (ПП) в черничном, брусничном и кустарничково-сфагновом типах леса. Для определения радиального роста образцы кернов отбирали с помощью возрастного бура (Haglof, Швеция) на высоте 1,3 м от шейки корня в направлении юг–север. На каждом пробном участке было отобрано 9–10 кернов. Таксационные характеристики исследуемых древостоев представлены в табл. 1.

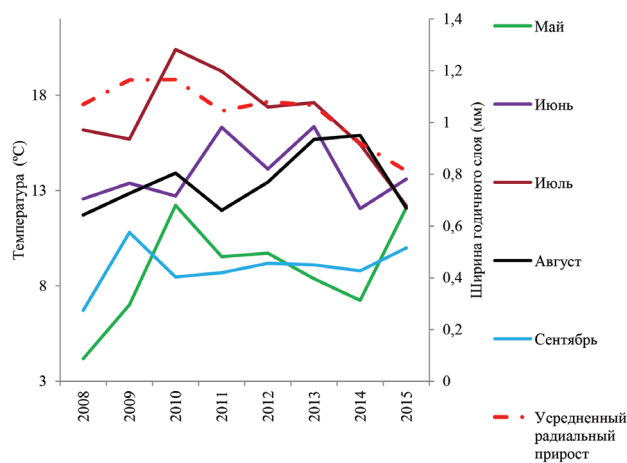
Таблица 1

Таксационные характеристики исследуемых древостоев
Inventory characteristics of the studied stands

ПП	Тип сосняка	Состав	Средние		Возраст (лет)	Полнота
			высота (м)	диаметр (см)		
1	Черничный	6С3Е1Б	17	22	65	0,8
2		10С	18	18	70	0,7
3		9С1Б	16	14	50	0,8
4		6С4Е	18,5	19	75	0,7
5		6С4Е+Б	18	18	80	0,7
6	Брусничный	9С1Е	16	18	60	0,7
7	Кустарничково-сфагновый	10С	4,5	5	62	–

Появление цифровых мобильных метеостанций позволило не только увеличить количество анализируемых параметров и уменьшить дискретность замеров, но и максимально приблизить станции к ПП. Температура воздуха ($t_{\text{воз}}$), температура точки росы ($t_{\text{тч. росы}}$), относительная влажность воздуха (H), количество осадков (P), скорость ветра ($V_{\text{ветр}}$) регистрировались автоматически с помощью цифровой мобильной метеостанции WMR 918H (Huger GmbH, Германия) в период с 2007 по 2016 г. на высоте 2 м. Метеостанция расположена вблизи от ПП.

Средние значения метеорологических параметров за май–сентябрь приведены на рис. 1.



a

Рис. 1. Динамика среднемесячных значений метеорологических параметров за май–сентябрь 2008–2015 гг.:
a – температура воздуха (начало)

Fig. 1. Dynamics of average monthly values of meteorological parameters for May–September 2008–2015:
a – air temperature (beginning)

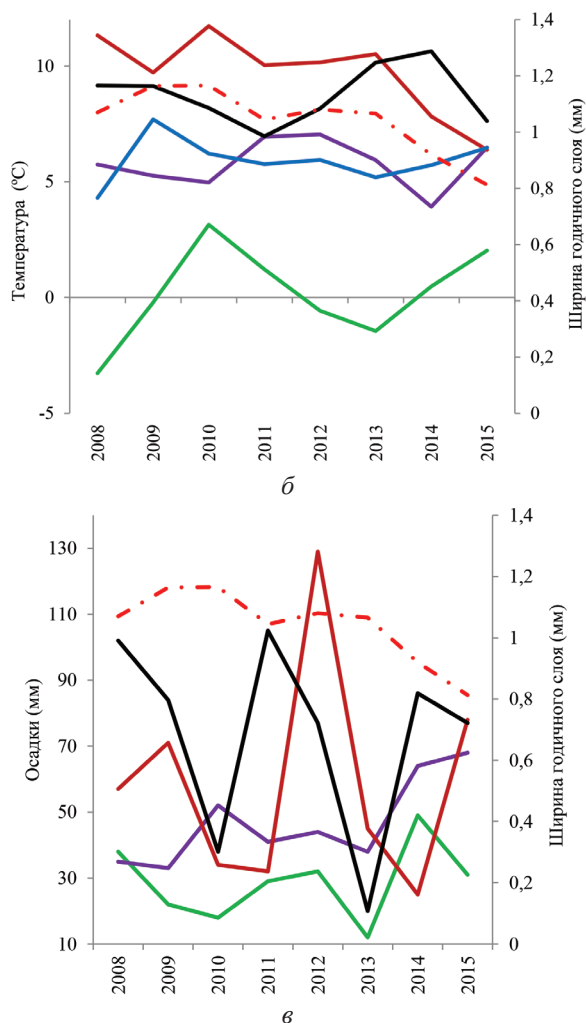


Рис. 1. Динамика среднемесячных значений метеорологических параметров за май–сентябрь 2008–2015 гг.: δ – температура точки росы; ϵ – годовое количество осадков (продолжение)

Fig. 1. Dynamics of average monthly values of meteorological parameters for May–September 2008–2015: δ – dew point temperature; ϵ – annual precipitation (continued)

В связи с тем, что в начале вегетации ночь длится не более 2 ч, а к сентябрю увеличивается до 12 ч, для расчета мы использовали продолжительность ночи от заката до восхода солнца, рассчитанную для каждого дня.

Измерения роста древесины проводили прибором Lintab 6, пользуясь программным обеспечением TSAP-Win (версия 4.80), с точностью 0,01 мм. Статистическую обработку полученных данных (корреляция Пирсона) осуществляли при помощи программного обеспечения Python версии 2.7.12, 2016 и пакета SciPy версии 0.18.1, 2016.

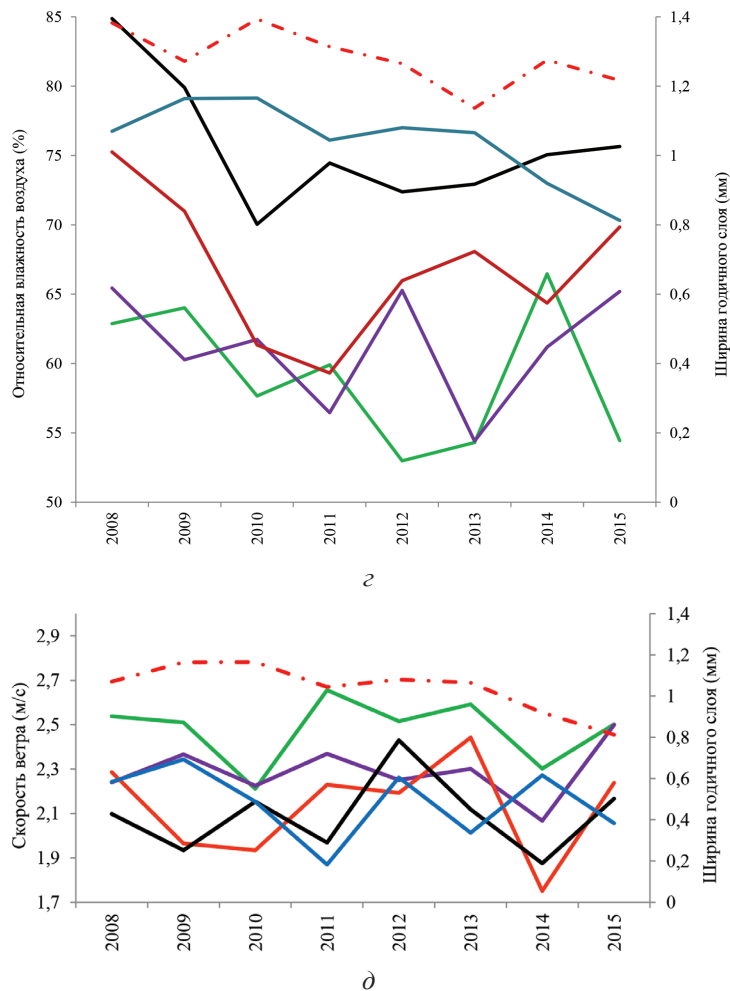


Рис. 1. Динамика среднемесячных значений метеорологических параметров за май–сентябрь 2008–2015 гг.: z – относительная влажность воздуха; δ – скорость ветра (окончание)

Fig. 1. Dynamics of average monthly values of meteorological parameters for May–September 2008–2015: z – relative air humidity; δ – wind velocity (ending)

Результаты исследования и их обсуждение

Максимальный рост сосны был зафиксирован в 2010 г., а затем наблюдалось постепенное снижение. По метеорологическим параметрам данный год не является аномальным. Он отличается от остальных только высокой температурой воздуха в июле, низкими температурой точки росы в августе и относительной влажностью воздуха в июле (рис. 1).

Динамика радиального роста исследуемых древостоев сходна. Пик прироста приходится на 2009–2010 гг., и затем наступает его спад. Радиальный рост на ПП 3 в эти годы наоборот увеличивается, что, вероятно, связано с изменением локальных почвенно-грунтовых условий (рис. 2).

В сосняке черничном отмечены четко выраженные периоды подъема и спада прироста [9]. В 2010 г. наступил переломный момент между этими периодами (рис. 2).

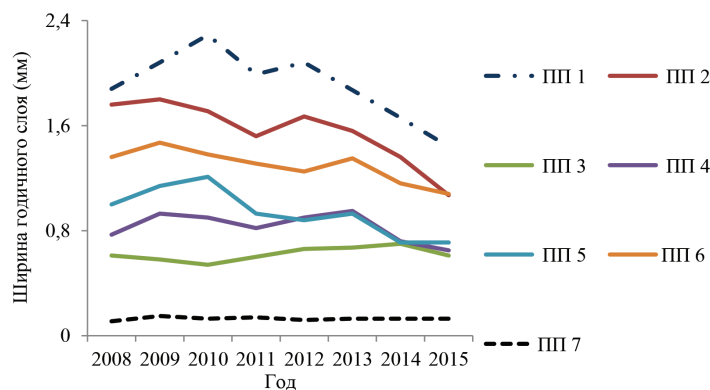


Рис. 2. Динамика радиального роста сосны за 2008–2015 гг.

Fig. 2. Pine radial growth dynamics in 2008–2015

Изменчивость радиального прироста в сосняке кустарничково-сфагновом минимальна и существенных тенденций не наблюдается.

Сосняк черничный. На 4 из 5 ПП установлена высокая корреляция радиального роста с температурами воздуха и точки росы июля. На ПП 2 наблюдалась наибольшая корреляция прироста как с дневной (0,80), так и с ночной (0,88) температурами, а корреляция с максимальными температурами точки росы дня и ночи достигает 0,81 и 0,90 соответственно. На ПП 3 выявлена прямая корреляция прироста с минимальными суточными скоростями ветра мая, июня и сентября (0,77–0,78). На ПП 4 – обратная корреляция с минимальными суточными значениями мая, июня, августа и сентября (–0,79...–0,84). На ПП 5 установлена обратная корреляция (–0,72) с осадками мая и июня. С относительной влажностью воздуха корреляция не выявлена (табл. 2).

Значительные различия корреляции радиального роста и метеофакторов в сосняке черничном, вероятно, связаны с широкими эдафическими условиями этого типа леса.

Сосняк брусничный. Выявлены корреляции прироста с ночной температурой (0,72–0,74) и максимальными температурами точки росы дня и ночи июля (0,76–0,81), обратная корреляция – с минимальной скоростью ветра в сентябре (–0,7) и осадками в июне (–0,85). С относительной влажностью воздуха корреляция не обнаружена.

Сосняк кустарничково-сфагновый. Установлены: корреляция радиального роста с температурой воздуха (0,77) и температурой точки росы сентября (0,71–0,82); обратная корреляция с суточной (–0,72) и дневной (–0,71) относительной влажностью воздуха июня и с ночной сентября (–0,82). Со скоростью ветра также выявлена обратная корреляция: с минимальной суточной (–0,82) и ночной (–0,71...–0,84) августа, с максимальной ночной сентября (–0,79). С осадками корреляция не обнаружена.

Таблица 2

Корреляция ширины годичного слоя сосны и метеопараметров
Correlation of the pine annual ring width and meteorological parameters

Метеопараметр	ПП 1					ПП 2					ПП 3				
	май	июнь	июль	август	сентябрь	май	июнь	июль	август	сентябрь	май	июнь	июль	август	сентябрь
$t_{\text{возд}}^*$ суточная средняя	-0,37	-0,02	0,65	-0,01	-0,16	-0,03	-0,14	0,83	-0,05	-0,08	-0,26	0,10	-0,34	0,60	-0,02
дневная максимальная	-0,33	0,06	0,59	-0,01	-0,25	-0,15	-0,11	0,79	-0,08	-0,25	-0,14	0,28	-0,37	0,51	0,04
дневная минимальная	-0,34	0,07	0,62	-0,07	-0,25	-0,15	-0,10	0,80	-0,09	-0,26	-0,13	0,29	-0,35	0,54	0,10
ночная максимальная	-0,21	-0,17	0,75	0,20	0,12	0,06	-0,09	0,88	0,00	0,09	-0,20	0,54	-0,41	0,69	-0,23
ночная минимальная	-0,22	-0,09	0,75	0,18	0,06	0,07	-0,15	0,86	-0,02	0,06	-0,22	0,51	-0,38	0,68	-0,12
$t_{\text{тч, росы}}^*$ суточная средняя	-0,33	-0,09	0,45	0,23	0,02	0,00	0,10	0,22	-0,12	0,13	-0,41	-0,11	-0,22	0,21	-0,34
дневная максимальная	-0,32	0,08	0,83	0,04	0,04	0,02	0,02	0,81	-0,14	0,11	-0,40	-0,07	-0,43	0,52	-0,45
дневная минимальная	0,32	-0,09	0,48	0,23	0,01	-0,02	0,12	0,26	-0,13	0,11	-0,41	-0,10	-0,24	0,15	-0,44
ночная максимальная	-0,32	-0,29	0,84	0,15	0,01	-0,01	-0,08	0,90	-0,13	0,13	-0,36	0,15	-0,45	0,70	-0,25
ночная минимальная	-0,33	-0,27	0,63	0,23	0,10	-0,01	0,02	0,46	0,11	0,23	-0,38	0,01	-0,30	0,18	-0,23
H : суточная средняя	0,19	-0,27	-0,23	0,00	0,34	-0,02	-0,28	-0,54	-0,31	0,38	0,02	0,03	0,36	-0,01	-0,53

Окончание табл. 2

Метеопараметр	ПП 1				ПП 2				ПП 3						
	май	июнь	июль	август	сентябрь	май	июнь	июль	август	сентябрь	май	июнь	июль	август	сентябрь
<i>H</i> :															
дневная средняя	0,27	-0,20	-0,18	0,17	0,46	0,06	-0,25	-0,50	-0,15	0,46	-0,01	0,03	0,26	-0,16	-0,63
ночная средняя	-0,70	-0,28	-0,30	-0,49	-0,10	-0,23	-0,18	-0,47	-0,61	0,01	-0,13	-0,22	0,62	0,30	0,19
$V_{\text{ветр}}$:															
суточная средняя	-0,34	-0,61	-0,37	-0,22	0,00	-0,16	-0,34	-0,18	0,01	-0,06	0,33	-0,09	0,26	0,22	0,44
суточная максимальная	0,10	-0,05	-0,42	0,03	0,12	0,25	0,20	-0,15	0,31	0,29	0,59	0,27	0,41	0,27	0,26
суточная минимальная	-0,59	-0,64	-0,62	-0,28	-0,64	-0,50	-0,45	-0,52	-0,42	-0,50	0,78	0,67	0,78	0,46	0,77
дневная максимальная	-0,22	-0,61	-0,51	-0,14	0,49	-0,12	-0,60	-0,47	-0,02	0,40	0,22	0,30	0,67	0,33	-0,52
дневная минимальная	-0,33	-0,45	-0,02	-0,17	0,04	0,24	0,13	-0,27	-0,04	-0,24	-0,27	-0,15	-0,66	-0,18	-0,07
ночная максимальная	0,53	0,18	-0,16	0,23	0,52	0,28	-0,10	-0,40	0,13	0,26	0,13	0,13	0,28	0,29	-0,18
ночная минимальная	0,35	0,15	-0,10	0,22	0,16	0,35	0,15	-0,10	0,22	0,16	-0,32	-0,19	0,02	-0,09	0,35
<i>P</i> среднее	-0,36	-0,81	0,09	0,04	-	-0,44	-0,67	0,10	-0,14	-	0,45	0,27	0,10	-0,04	-

Примечание: Достоверные коэффициенты корреляции ($p < 0,05$) выделены полужирным шрифтом.

Обратная корреляция между относительной влажностью воздуха и радиальным ростом в сосняке кустарничково-сфагновом свидетельствует об ухудшении водного состояния деревьев и замедлении ростовых процессов.

В целом сосна в черничном, брусничном и кустарничково-сфагновом типах леса имеет сходную реакцию на изменчивость метеофакторов, основным из которых является температурный режим воздуха. Только в кустарничково-сфагновом типе обнаружена корреляция с относительной влажностью воздуха и не обнаружена с осадками.

Полученные нами результаты указывают на июльскую температуру как на основной фактор, влияющий на радиальный рост сосны.

Заключение

Анализ динамики радиального прироста сосны обыкновенной, произрастающей в подзоне северной тайги на севере Русской равнины, выявил определенные закономерности изменчивости данного параметра. Обнаружено, что радиальный прирост в северотаежных сосняках в условиях умеренно континентального климата подвержен сильному влиянию метеопараметров.

В черничном, брусничном и кустарничково-сфагновом типах леса основными факторами, воздействующими на радиальный рост, являются ночная температура воздуха и температура точки росы июля. Менее значительно влияние осадков и скорости ветра. Таким образом, установлено, что температурный режим воздуха текущего вегетационного периода оказывает наибольшее и существенное воздействие по сравнению с другими метеопараметрами на радиальный рост типичных сосновых лесов северной тайги Европейского Севера России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабушкина Е.А., Ваганов Е.А., Силкин П.П. Влияние климатических факторов на клеточную структуру годовых колец хвойных, произрастающих в различных топоэкологических условиях лесостепной зоны Хакасии // Журн. СФУ. Сер.: Биология. 2010. Т. 3, № 2. С. 159–177.

Babushkina E.A., Vaganov E.A., Silkin P.P. Influence of Climatic Factors on Tree-Ring Cell Structure of Conifers Growing in Different Topoecological Conditions in Forest-Steppe Zone of Khakassia. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2010, vol. 3, no. 2, pp. 159–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0209>

2. Бабушкина Е.А., Кнорре А.А., Ваганов Е.А., Брюханова М.В. Трансформация климатического отклика в радиальном приросте деревьев в зависимости от топоэкологических условий их произрастания // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 159–166.

Babushkina E.A., Vaganov E.A., Knorre A.A., Bryukhanova M.V. Transformation of Climatic Response in Radial Increment of Trees Depending on Topoecological Conditions of Their Occurrence. *Geografia i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*, 2011, no. 1, pp. 159–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1875372811010148>

3. Болботунов А.А., Дегтярева Е.В. Особенности сезонного годовичного прироста древесины хвойных пород в насаждениях на севере Беларуси // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф: Строительство. Прикладные науки. 2020. № 8. С. 29–32.

Bolbotunov A.A., Degtjareva E.V. Features of the Seasonal Annual Increment of Conifers Wood in Forests in the North of Belarus. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, 2020, no. 8, pp. 29–32. (In Russ.).

4. Кучеров С.Е., Васильев Д.Ю., Мулдашев А.А. Реконструкция осадков мая–июня по радиальному приросту сосны обыкновенной на Бугульминско-Белебеевской возвышенности для территории Башкирии // Экология. 2016. № 2. С. 83–93.

Kucherov S.E., Vasil'ev D.Y., Muldashev A.A. Reconstruction of May–June Precipitation in the Territory of Bashkiria Based on Scots Pine Tree-Ring Data from the Bugulma–Belebey Upland. *Ekologia = Russian Journal of Ecology*, 2016, no. 2, pp. 83–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0367059716010078>

5. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Сосновые леса России. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2008. 289 с.

Rysin L.P., Savel'yeva L.I. *Pine Forests of Russia*. Moscow, KMK Publ., 2008. 289 p. (In Russ.).

6. Скомаркова М.В., Ваганов Е.А., Вирт К., Кирдянов А.В. Климатическая обусловленность радиального прироста хвойных и лиственных пород деревьев в подзоне средней тайги Центральной Сибири // География и природные ресурсы. 2009. № 2. С. 80–85.

Skomarkova M.V., Kirdyanov A.V., Vaganov E.A., Wirth C. Climatic Conditionality of Radial Increment of Conifers and Hardwoods in the Middle Taiga Subzone of Central Siberia. *Geografia i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*, 2009, no. 2, pp. 80–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2009.06.014>

7. Феклистов П.А., Евдокимов В.Н., Барзут В.М. Биологические и экологические особенности роста сосны в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: АГТУ, 1997. 140 с.

Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Barzut V.M. *Biological and Ecological Features of Pine Growth in the Northern Subzone of European Taiga*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1997. 140 p. (In Russ.).

8. Цветков В.Ф. Камо грядеши (Некоторые вопросы лесоведения и лесоводства на Европейском Севере). Архангельск: АГТУ, 2000. 253 с.

Tsvetkov V.F. *Kamo gryadeshi (Some Issues of Forestry and Forest Science in the European North)*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2000. 253 p. (In Russ.).

9. Шишов В.В., Наурызбаев М.М., Ваганов Е.А., Ивановский А.Б., Корец М.А. Анализ изменчивости радиального прироста древесных растений на территории севера Евразии в последние десятилетия // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2007. № 3. С. 49–58.

Shishov V.V., Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., Ivanovsky A.B., Korets M.A. The Analysis of Tree-Ring Growth on Eurasian North at the Last Decades. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya = Regional Research of Russia*, 2007, no. 3, pp. 49–58. (In Russ.).

10. Antonova G.F., Stasova V.V. Effect of Environmental Factors on Wood Formation in Scots Pine Stems. *Trees*, 1993, vol. 7, pp. 214–219. <https://doi.org/10.1007/BF00202076>

11. Burgess S.S.O., Dawson T.E. The Contribution of Fog to the Water Relations of *Sequoia sempervirens* (D. Don): Foliar Uptake and Prevention of Dehydration. *Plant Cell & Environment*, 2004, vol. 27, iss. 8, pp. 1023–1034. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01207.x>

12. Edvardsson J., Rimkus E., Corona C., Šimanauskienė R., Kažys J., Stoffel M. Exploring the Impact of Regional Climate and Local Hydrology on *Pinus sylvestris* L. Growth Variability – A Comparison between Pine Populations Growing on Peat Soils and Mineral Soils in Lithuania. *Plant and Soil*, 2015, vol. 392, pp. 345–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2466-9>

13. Hellmann L., Agafonov L., Ljungqvist F.C., Churakova O., Duthorn E., Esper J. et al. Diverse Growth Trends and Climate Responses across Eurasia's Boreal Forest. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, art. 074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074021>

14. Hughes M.K., Olchev A., Bunn A.G., Berner L.T., Losleben M., Novenko E. Different Climate Responses of Spruce and Pine Growth in Northern European Russia. *Dendrochronologia*, 2019, vol. 56, art. 125601. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.05.005>

15. Kirchhefer A.J. Reconstruction of Summer Temperature from Tree-Rings of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Coastal Northern Norway. *The Holocene*, 2001, vol. 11, iss. 1, pp. 41–52. <https://doi.org/10.1191/095968301670181592>
16. Koval I. Climatic Signal in Earlywood, Latewood and Total Ring Width of Crimean Pine (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana*) from Crimean Mountains, Ukraine. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, no. 2(37), pp. 245–251.
17. Kozłowski T.T. Water Supply and Tree Growth. Part II. Flooding. *Forestry Abstracts*, 1982, vol. 43, pp. 145–161.
18. Lebourgeois F. Climatic Signals in Earlywood, Latewood and Total Ring Width of Corsican Pine from Western France. *Annals of Forest Science*, 2000, vol. 57, no. 2, pp. 155–164. <https://doi.org/10.1051/forest:2000166>
19. Limm E.B., Simonin K.A., Bothman A.G., Dawson T.E. Foliar Water Uptake: A Common Water Acquisition Strategy for Plants of the Redwood Forest. *Oecologia*, 2009, vol. 161, pp. 449–459. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1400-3>
20. Lindholm M., Lehtonen H., Kolström T., Meriläinen J., Eronen M., Timonen M. Climatic Signals Extracted from Ring-Width Chronologies of Scots Pines from the Northern, Middle and Southern Parts of the Boreal Forest Belt in Finland. *Silva Fennica*, 2000, vol. 34, no. 4, pp. 317–330. <https://doi.org/10.14214/sf.616>
21. Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Impact of Climate Change on Radial Growth of Siberian Spruce and Scots Pine in North-Western Russia. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2008, vol. 1, iss. 1, pp. 13–21. <https://doi.org/10.3832/ifer0447-0010013>
22. Macias M., Timonen M., Kirchhefer A.J., Lindholm M., Eronen M., Gutiérrez E. Growth Variability of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) along a West-East Gradient across Northern Fennoscandia: A Dendroclimatic Approach. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2004, vol. 36, iss. 4, pp. 565–574. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0565:GVOSPP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0565:GVOSPP]2.0.CO;2)
23. Moir A.K., Leroy S.A.G., Helama S. Role of Substrate on the Dendroclimatic Response of Scots Pine from Varying Elevations in Northern Scotland. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, vol. 41(4), pp. 822–838. <https://doi.org/10.1139/x10-241>
24. Nikolaev A.N., Federov P.P., Desyatkin A.R. Influence of Climate and Soil Hydrothermal Regime on Radial Growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, iss. 3, pp. 217–226. <https://doi.org/10.1080/02827580902971181>
25. Oberhuber W., Gruber A. Climatic Influences on Intra-Annual Stem Radial Increment of *Pinus sylvestris* (L.) Exposed to Drought. *Trees*, 2010, vol. 24, iss. 5, pp. 887–898. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0458-1>
26. Seo J.-W., Eckstein D., Jalkanen R., Schmitt U. Climatic Control of Intra- and Inter-Annual Wood-Formation Dynamics of Scots Pine in Northern Finland. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, vol. 72, iss. 3, pp. 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.01.003>
27. Shestakova T.A., Gutiérrez E., Valeriano C., Lapshina E., Voltas J. Recent Loss of Sensitivity to Summer Temperature Constrains Tree Growth Synchrony among Boreal Eurasian Forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, vol. 268, pp. 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.039>
28. Wodzicki T.J. Mechanism of Xylem Differentiation in *Pinus silvestris* L. *Journal of Experimental Botany*, 1971, vol. 22, iss. 3, pp. 670–687. <https://doi.org/10.1093/jxb/22.3.670>

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

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

Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2022 г.

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Kul'kova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbaev Y.Zh., Kentbaeva B.A. Growth of Schrenk's Spruce (*Picea schrenkiana*) Seedlings Related to the Pre-Sowing Stimulating Seed Treatment. № 4-39

Miletić B., Drašković B., Đorem T., Bojić S., Matović B., Stojanović D.B. The Potential Impact of Climate Change on the Distribution of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.) in Bosnia and Herzegovina. № 2-73

Sungurova N.R., Popkova I.A. Productivity of Pine Plantations during Reclamation of Sand Quarries. № 2-50

Алиев Б.Г., Мамедалиева В.М. Состояние лесных массивов на насыщенных оксидами железа почвах Азербайджана. № 6-117

Андропова М.М., Платонов А.В. Сахароза в тканях однолетних побегов древесных растений-интродуцентов. № 1-62

Бабииков Б.В., Субота М.Б. Гидромелиорация в лесном хозяйстве: история научных исследований. № 3-103

Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И., Кулик К.Н., Кулик А.К. Морфологические показатели крон лещины в горных лесах. № 2-59

Братилова Н.П., Моксина Н.В., Герасимова О.А. Отбор полусибов видов рода *Malus* L. по показателям роста и формирования в пригородной зоне Красноярска. № 3-60

Брынцев В.А., Лавренов М.А., Коженкова А.А. Исследование морфологических признаков и посевных качеств семян видов рода *Larix* Mill. в условиях интродукции. № 2-26

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Реинтродукция карельской березы. № 3-9

Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Блонская Л.Н., Фазлутдинов И.И. Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.). № 5-21

Галдина Т.Е., Чернодубов А.И. Продуктивность лиственницы различного происхождения в условиях Воронежской области. № 4-101

Гордеева Г.Н., Лобанов А.И. Продолжительность жизненного цикла и зимостойкость древесных интродуцентов в сухостепной зоне Хакасии. № 3-73

Грязькин А.В., Тхань Чан Чунг, Хунг Ву Ван, Прокофьев А.Н., Минь Ань Хоанг. Комплексная оценка сырьевых ресурсов березняков. № 1-23

Гусакова М.А., Боголицын К.Г., Красикова А.А., Селиванова Н.В., Хвиюзов С.С., Самсонова Н.А. Характеристика формирования древесного вещества при выращивании сеянцев сосны обыкновенной с использованием химических маркеров. № 1-36

Зарубина Л.В. Влияние удобрений на суточный рост сосны на торфяно-болотных почвах. № 4-115

Зотов С.А., Дмитриев Е.В., Мельник П.Г., Кондранин Т.В. Повышение информативности мультиспектральных спутниковых изображений с использованием данных текстурного анализа. № 2-84

Игнатенко Р.В., Ершова М.А., Галибина Н.А., Раевский Б.В. Цитоген-

нетическая характеристика семенного потомства клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии. № 1-9

Кабонен А.В., Гаврилова О.И., Кищенко И.Т. Цифровое сканирование роста и развития древесных растений. № 6-55

Колмогорова Е.Ю., Уфимцев В.И. Почвенные характеристики эмбриоземов под покровом сосновых насаждений на техногенных элювиях Кузбасса. № 2-118

Коновалова И.С., Коновалов Д.Ю. Эколого-ценотическая активность видов среднетаежной флоры. № 6-94

Лепеско В.В., Рыбашлыкова Л.П. Особенности роста вяза приземистого на бурых почвах Астраханской полупустыни. № 3-119

Лящева Л.В., Лящев А.А., Штейнберг Ю.С. Зимостойкость хвойных растений в условиях северной лесостепи юга Тюменской области. № 1-49

Макаров В.П., Малых О.Ф., Желлибо Т.В. Изменчивость признаков генеративных органов лиственницы Гмелина в условиях Восточного Забайкалья. № 4-70

Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Заушинцева А.В., Куликова Е.И., Тяк Г.В., Курлович Т.В. Повышение эффективности многоцелевого лесопользования на выработанных торфяниках. № 3-91

Макаров С.С., Упадышев М.Т., Кузнецова И.Б., Заушинцева А.В., Куликова Е.И., Сурина Е.А. Применение освещения различного спектрального диапазона при клональном микроразмножении лесных ягодных растений. № 6-82

Манаенков А.С., Пономарев А.С. Лесопригодность экотопов Волго-Ахтубинской поймы для культур сосны. № 4-127

Мамедалиева В.М. Изменение лесных массивов северо-восточного региона Азербайджана по космическим снимкам. № 1-88

Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Интродукция климатипов лиственницы европейской в зоне смешанных лесов. № 5-37

Михалищев Р.В., Сродных Т.Б. Семенное размножение видов рода *Spiraea* L. в условиях ботанического сада Уральского федерального университета. № 5-47

Мухин А.К. Особенности динамики лишайниковых сосняков в условиях подтопления Рыбинским водохранилищем. № 4-52

Новосёлов А.С. Динамика выделения соснового терпентина в зависимости от макроструктурных показателей древесины на болотных почвах. № 2-105

Осипов А.Ф., Кутявин И.Н., Манов А.В., Кузнецов М.А., Бобкова К.С. Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми. № 4-25

Примаков Н.В. Перспективность применения древесно-кустарниковых растений в озеленении города Краснодар. № 1-98

Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России. № 2-9

Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонок Е.В., Прокопюк В.М., Куклина К.К. Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород. № 6-9

Рубцова Т.А., Зубарева А.М. Характеристика медоносных угодий и их пожароопасность в Еврейской автономной области. № 3-32

Соболев А.Н., Феклистов П.А. Особенности строения сосновых древостоев на острове Большом Соловецком. № 1-77

Соболев А.Н., Феклистов П.А., Попова Л.Ф. Ветрозащитная роль березового криволесья на Большом Соловецком острове. № 4-91

Соломенцева А.С. Состояние древесных растений на объектах защитного лесоразведения и озеленения Калачевского района Волгоградской области. № 5-58

Стороженко В.Г. Особенности горизонтальной структуры лесов еловых формаций европейской тайги России. № 2-39

Тишкина Е.А., Семкина Л.А., Шевелина И.В. Расширение ареала *Cotoneaster lucidus* Schlecht. в лесопарках г. Екатеринбурга. № 5-73

Тужилкина В.В. Функциональная характеристика хвои подроста ели сибирской под пологом и на вырубке ельника черничного в подзоне средней тайги. № 6-107

Тюкавина О.Н., Попова Л.Ф. Корневая система тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). № 6-71

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Данилин И.М. Разработка модели биомассы *Picea* L. и *Abies* L. для региональных условий Евразии. № 6-38

Фомин В.В., Иванова Н.С., Залесов С.В., Михайлович А.П. Общеввропейские подходы к классификации местообитаний, растительности и типов леса. № 4-9

Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Лаур Н.В. Селекционные испытания факториальных гибридов *Populus tremula* L. в ювенильном возрасте. № 5-9

Чеплянский И.Я., Турчин Т.Я., Ермолова А.С. Дистанционный мо-

ниторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России. № 3-44

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатические аппараты для лесозаготовок в труднодоступных районах. № 1-110

Боргонутдинов А.М., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Ефимов Д.С., Швецова В.В. Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог. № 2-146

Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Использование плоских сплоченных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов. № 1-128

Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Обоснование показателя гибкости плота из сплоченных единиц. № 4-146

Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Териннов Н.Н., Уразова А.Ф. Обоснование технологических параметров процесса трелевки древесины мини-трактором при проходных рубках. № 6-126

Добрецов Р.Ю., Добрецова С.Б., Войнаш С.А., Соколова В.А. Математическая модель формирования глубины колеи лесной гусеничной машины. № 2-132

Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф. Размерно-качественные характеристики круглых сортиментов, заготавливаемых с применением многооперационных лесных машин. № 5-114

Заикин А.Н., Сиваков В.В., Булхов Н.А., Коньшакова С.А., Кузнецов С.Г. Применение комплексов лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан. № 3-139

Колесников Г.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Макуев В.А., Сто-

родубцева Т.Н., Швецова В.В. Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке. № 5-100

Мацнев М.В., Пономарева Н.Г., Тверитнев О.Н., Тихомиров П.В., Левушкин Д.М., Брюховецкий А.Н. Расчет величины задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог. № 4-156

Питухин Е.А., Рогозин С.С. Оптимизация режимов работы лесопожарной машины. № 6-139

Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-роспуском. № 5-85

Посыпанов С.В., Чупраков В.О. Обоснование параметров балластных емкостей мобильного причала для перевалки лесоматериалов. № 1-143

Рукомойников К.П., Царев Е.М., Анисимов С.Е., Татаринев Д.С., Купцова В.О., Гилязова Т.А. Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевочного механизма лесного харвестера. № 3-130

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Susoeva I.V., Vakhnina T.N., Titunin A.A., Rummyantseva V.E. Processing Factors and Properties of Thermal Insulation Boards Made of Plant Fillers. № 4-185

Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Susoeva I.V., Rummyantseva V.E. Plywood and Thermal Insulation Boards Based on the Modified Phenol Formaldehyde Binder. № 1-155

Бирман А.Р., Тамби А.А., Угрюмов С.А., Гильванов П.Р. Технология

модификации древесины березы для создания нейтронозащитных материалов. № 2-159

Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Агафонов А.С. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена. № 1-166

Иванов Д.В., Бака К.Э., Конарейкина Д.А. Измельченные бумажно-смоляные пленки как реакционно-способные наполнители карбамидоформальдегидных смол. № 3-153

Мелехов В.И., Соловьев И.И., Пономарева Н.Г. Формирование коаксиальных полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы. № 2-170

Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной. № 6-153

Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Костюков И.И., Михайлова А.Е., Войнаш С.А. Абразивный инструмент из сфорокорунда для обработки древесины. № 5-131

Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М. Послойный динамический модуль сдвига в поперечном сечении древесностружечной плиты. № 5-143

Томина Е.В., Дмитренко А.И., Жужукин К.В. Использование наноразмерного ZnO в составах для защитной обработки древесины. № 4-173

Федюков В.И., Чернов В.Ю., Чернова М.С., Цой О.В. Резонансные акустические и колориметрические характеристики древесины из ретро-сооружений. № 6-164

Чибрикин Д.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Тюрикова Т.В., Рощина С.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки. № 3-167

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И., Фалева А.В. Кинетические закономерности процесса водно-щелочного гидролиза березовой коры в СВЧ-поле. № 3-179

Коршунов А.О., Лаврентьева Е.А., Лазарев М.А., Радбиль А.Б. Оптимизация процесса омыления таллового пека методом планирования эксперимента. № 1-173

Коряковская Н.В., Бедердинова О.И. Контроль и регулирование влажности бумажного полотна. № 1-188

Криницин Н.А., Дубовый В.К., Полякова К.В., Ковернинский И.Н. Исследование влияния вида связующего на свойства фильтровальных стекловолокнистых бумаг для очистки воздуха. № 2-178

Паламарчук И.А., Белоусова М.Е., Бровко О.С., Старицын В.В., Ивахнов А.Д., Слобода А.А. Содержание фенольных соединений в лишайниках в зонах тектонических разломов. № 4-198

Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон. № 5-157

Пименов С.Д., Мзюков Г.В., Сизов А.И. Гидролиз целлюлозы с использованием газовой смеси хлористого водорода. № 3-191

Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Грунин Л.Ю., Иванова М.С., Зиятдинова Д.Ф. Контроль качества активированного угля методом ядерного магнитного резонанса. № 5-173

Старжинская Е.В., Кряжев А.М., Третьяков С.И., Глуханов А.А. Выделение сульфатного мыла из щелоков от варки смешанных пород древесины. № 6-178

Хабаров Ю.Г., Гаркотин А.Ю., Вешняков В.А. Исследование нитрования сульфатного лигнина ацетилнитратом в апротонных растворителях. № 2-193

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Адаи Д.М., Эшун Д.Ф., Марфо Э.Д., Бабич Н.А., Мелехов В.И., Клевцов Д.Н. Лесные ресурсы Республики Гана. № 5-186

Лисицын В.И., Драпалюк М.В., Матвеев Н.Н. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода. № 3-213

Михайлов К.Л., Горбунова С.В., Файзулин Д.Х. Создание тепличных комплексов для выращивания посадочного материала сосны. № 5-195

Неверов Н.А., Чистова З.Б., Минеев А.Л. Радиальный рост сосны обыкновенной в условиях северной тайги. № 6-193

Скуднева О.В. Навигационно-пилотажная система транспортных беспилотных летательных аппаратов для лесохозяйственной практики. № 3-203