

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

1

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)
Тельшева Г.М., д-р хим. наук, проф. (Латвия, Рига)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
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

1

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)
Telysheva G.M., Doctor of Chemistry, Prof. (Latvia, Riga)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
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

- Р.В. Игнатенко, М.А. Ершова, Н.А. Галибина, Б.В. Раевский.* Цитогенетическая характеристика семенного потомства клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии..... 9
- А.В. Грязькин, Тхань Чан Чунг, Хунг Ву Ван, А.Н. Прокофьев, Минь Ань Хоанг.* Комплексная оценка сырьевых ресурсов березняков..... 23
- М.А. Гусакова, К.Г. Боголицын, А.А. Красикова, Н.В. Селиванова, С.С. Хвиюзов, Н.А. Самсонова.* Характеристика формирования древесного вещества при выращивании семян сосны обыкновенной с использованием химических маркеров..... 36
- Л.В. Лящева, А.А. Лящев, Ю.С. Штейнберг.* Зимостойкость хвойных растений в условиях северной лесостепи юга Тюменской области..... 49
- М.М. Андропова, А.В. Платонов.* Сахароза в тканях однолетних побегов древесных растений-интродуцентов..... 62
- А.Н. Соболев, П.А. Феклистов.* Особенности строения сосновых древостоев на острове Большом Соловецком..... 77
- В.М. Мамедалиева.* Изменение лесных массивов северо-восточного региона Азербайджана по космическим снимкам..... 88
- Н.В. Примаков.* Перспективность применения древесно-кустарниковых растений в озеленении города Краснодар..... 98

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- А.В. Абузов, П.Б. Рябухин.* Аэростатические аппараты для лесозаготовок в труднодоступных районах..... 110
- В.В. Васильев, Д.Н. Афоничев.* Использование плоских сплочных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов..... 128
- С.В. Посыпанов, В.О. Чупраков.* Обоснование параметров балластных емкостей мобильного причала для перевалки лесоматериалов..... 143

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- T.N. Vakhnina, A.A. Fedotov, I.V. Susoeva, V.E. Rummyantseva.* Plywood and Thermal Insulation Boards Based on the Modified Phenol Formaldehyde Binder... 155

-
- А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, А.С. Агафонов.* Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена..... 166

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- А.О. Коршунов, Е.А. Лаврентьева, М.А. Лазарев, А.Б. Радбиль.* Оптимизация процесса омыления таллового пека методом планирования эксперимента..... 173
- Н.В. Коряковская, О.И. Бедердинова.* Контроль и регулирование влажности бумажного полотна..... 188
-



CONTENTS

FORESTRY

| | |
|--|----|
| <i>R.V. Ignatenko, M.A. Ershova, N.A. Galibina, B.V. Raevsky.</i> Cytogenetic Characteristics of Seed Progeny of Scots Pine Plus Tree Clones in Karelia... | 9 |
| <i>A.V. Gryazkin, Thanh Tran Trung, Hung Vu Van, A.N. Prokof'yev, Minh An Hoang.</i> Integrated Assessment of Raw Material Resources of Birch Forests..... | 23 |
| <i>M.A. Gusakova, K.G. Bogolitsyn, A.A. Krasikova, N.V. Selivanova, S.S. Khviyuzov, N.A. Samsonova.</i> Characteristics of Wood Substance Formation during Growing of Scots Pine Seedlings Using Chemical Markers..... | 36 |
| <i>L.V. Lyasheva, A.A. Lyashev, Yu.S. Steinberg.</i> Winter Hardiness of Conifers in the Northern Forest Steppe Conditions of the South of the Tyumen Region..... | 49 |
| <i>M.M. Andronova, A.V. Platonov.</i> Sucrose in the Tissues of Annual Shoots of Introduced Woody Plants..... | 62 |
| <i>A.N. Sobolev, P.A. Feklistov.</i> Features of the Structure of Pine Stands on Bolshoy Solovetsky Island..... | 77 |
| <i>V.M. Mamedaliyeva.</i> Changes in Forested Areas of the North-Eastern Region of Azerbaijan Revealed by Satellite Images..... | 88 |
| <i>N.V. Primakov.</i> Prospects for Woody and Shrubby Plants in the Landscaping of Krasnodar..... | 98 |

LOGGING TECHNOLOGIES

| | |
|---|-----|
| <i>A.V. Abuzov, P.B. Ryabukhin.</i> Aerostatic Aircraft for Logging in Remote Forest Areas..... | 110 |
| <i>V.V. Vasiliev, D.N. Afonichev.</i> The Use of Flat Rafting Units during the Initial Timber Rafting..... | 128 |
| <i>S.V. Posypanov, V.O. Chuprakov.</i> Justification of Ballast Tank Parameters of a Mobile Berth for Timber Transshipment..... | 143 |

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

| | |
|--|-----|
| <i>T.N. Vakhnina, A.A. Fedotov, I.V. Susoeva, V.E. Rummyantseva.</i> Plywood and Thermal Insulation Boards Based on the Modified Phenol Formaldehyde Binder... | 155 |
| <i>A.G. Gorokhovskiy, E.E. Shishkina, A.S. Agafonov.</i> Lumber Convective Drying Based on Controlled Moisture Transfer..... | 166 |

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- A.O. Korshunov, E.A. Lavrenteva, M.A. Lazarev, A.B. Radbil'.* Optimization of Tall Oil Pitch Saponification by Experimental Design..... 173
- N.V. Koryakovskaya, O.I. Bederdinova.* Monitoring and Control of Paper Web Moisture..... 188
-



УДК 576.356:582.475.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-9-22

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕМЕННОГО ПОТОМСТВА КЛОНОВ ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В КАРЕЛИИ

Р.В. Игнатенко, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [A-7616-2019](https://orcid.org/0000-0001-9608-9465);

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

М.А. Ершова, аспирант; *ResearcherID*: [AAP-1610-2020](https://orcid.org/0000-0002-3728-9480);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3728-9480>

Н.А. Галибина, д-р биол. наук; *ResearcherID*: [H-8664-2017](https://orcid.org/0000-0003-1473-3574);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1473-3574>

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

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

Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: ocean-9@mail.ru, maria_ershova_karnc@mail.ru, galibina@krc.karelia.ru, borisraevsky@gmail.com

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 29.04.20 / Принята к печати 04.08.20

Аннотация. Изучены цитогенетические параметры семенного потомства клонов плюсовых деревьев *Pinus sylvestris*, произрастающих на Петрозаводской лесосеменной плантации I порядка. В качестве контроля были взяты нормальные деревья *P. sylvestris* из естественного соснового фитоценоза в Пряжинском районе Карелии. Рассматривали следующие показатели: относительное содержание ДНК, число хромосом, частоту и типы патологий митоза на стадиях метафазы, анафазы и телофазы (в процентах от общего числа делящихся клеток на тех же стадиях). Установлено, что в корневой меристеме семенного потомства *P. sylvestris* в диплоидном наборе содержится 24 хромосомы. У изученных растений были обнаружены единичные анеуплоидные клетки ($2n = 23$; $2n = 25$). Наиболее частотна моносомия ($2n = 23$) – 81 % от общего числа анеуплоидных клеток. Относительное содержание ДНК в молодой хвое проростков у клонов плюсовых деревьев составило $42,07 \pm 0,21$ пг, а у нормальных деревьев – $42,95 \pm 0,04$ пг, при этом разница между ними статистически значима (U-test, $p < 0,01$). В результате цитогенетического анализа выявлено 7 типов патологий митоза: фрагментация хромосом, мосты, забегание хромосом, обособление хромосом и групп хромосом, отставание хромосом, многополюсность, сложные нарушения. В общем спектре нарушений митоза наиболее распространенной патологией оказалось забегание хромосом. Сравнение различных типов патологий митоза в двух общих выборках нормальных деревьев и клонов плюсовых деревьев показало, что они значительно отличаются по следующим аномалиям митоза: забегание и обособление хромосом в метафазе, фрагментация, отставание, мосты и многополюсность в ана-телофазе. Выявлено: в семенном потомстве нормальных деревьев доля клеток с аномалиями митоза в среднем примерно в 1,5 раза выше, чем в потомстве клонов плюсовых деревьев ($3,44 \pm 0,32$ и $2,38 \pm 0,14$ % (U-test, $p < 0,05$) соответственно). Полученные данные свидетельствуют о цитогенетической стабильности семенного потомства клонов *P. sylvestris* с Петрозаводской лесосеменной плантации I порядка, это в свою очередь, может говорить о высоком качестве семенного материала.

Для цитирования: Игнатенко Р.В., Ершова М.А., Галибина Н.А., Раевский Б.В. Цитогенетическая характеристика семенного потомства клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-9-22

Финансирование: Финансирование исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0185-2019-0093).

Благодарность: Выражаем благодарность сотрудникам лаборатории биотехнологии растений КарНЦ РАН, а также лично канд. с.-х. наук, заместителю директора по научной работе ИЛ КарНЦ РАН С.А. Мошникову и научному сотруднику лаборатории динамики и продуктивности таежных лесов ИЛ КарНЦ РАН В.А. Харитонову за помощь в сборе полевого материала. Благодарим Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова за предоставленные семена *Triticum aestivum* и компанию «Диаэм» за возможность провести исследования на проточном цитофлуориметре Attune NxT (Thermo Fisher Scientific).

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, лесосеменные плантации, хромосомные нарушения, содержание ДНК, патологии митоза.

CYTOGENETIC CHARACTERISTICS OF SEED PROGENY OF SCOTS PINE PLUS TREE CLONES IN KARELIA

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

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

Maria A. Ershova, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAP-1610-2020](https://orcid.org/0000-0002-3728-9480)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3728-9480>

Nataliya A. Galibina, Doctor of Biology; ResearcherID: [H-8664-2017](https://orcid.org/0000-0003-1473-3574)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1473-3574>

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

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

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: ocean-9@mail.ru, maria_ershova_karnc@mail.ru, galibina@krc.karelia.ru, borisraevsky@gmail.com

Original article / Received on April 29, 2020 / Accepted on August 4, 2020

Abstract. The article describes the cytogenetic parameters of seed progeny of *Pinus sylvestris* plus trees growing in the Petrozavodsk seed orchard of the first order. *P. sylvestris* normal trees from the natural pine phytocenosis in the Pryazha region (Karelia) were taken as a control. The following indicators were considered: relative DNA content, number of chromosomes, frequency and types of mitosis pathologies at the metaphase, anaphase and telophase stages (in % of the total number of dividing cells at the same stages). It was found that the root meristem of the *P. sylvestris* seed progeny contains 24 chromosomes in the diploid set. Single aneuploid cells ($2n = 23$; $2n = 25$) were found in the studied plants. The most frequent is monosomy ($2n = 23$). It made up 81 % of the total number of aneuploid cells. The relative DNA content in the young needles of pine seedlings of plus clones and normal trees was 42.07 ± 0.21 and 42.95 ± 0.04 pg, respectively, and the difference between the two was statistically significant (U-test, $p < 0.01$). Cytogenetic analysis revealed 7 types of mitosis pathologies: chromosome fragmentation, chromosome bridges, chromosome overlap, isolation of chromosomes and groups of chromosomes, chromosome lagging, multipolar mitosis and complex abnormalities. Chromosome overlap was the most common pathology in the general mitotic disorders spectrum. Comparison of mitosis pathologies in two general samples of normal trees and

plus tree clones showed that they significantly differ by the following mitosis abnormalities: overlap and isolation of chromosomes in metaphase, fragmentation, lagging, bridges and multipolar mitosis in the anaphase and telophase. The study shows that the proportion of cells with mitosis abnormalities in the seed progeny of normal trees was about 1.5 times higher than of plus tree clones, and is equal 3.44 ± 0.32 and 2.38 ± 0.14 % (U-test, $p = 0.05$), respectively. The data obtained demonstrate the cytogenetic stability of the seed progeny of *P. sylvestris* clones from the Petrozavodsk seed orchard of the first order, which in turn may indicate the high quality of the seed material.

For citation: Ignatenko R.V., Ershova M.A., Galibina N.A., Raevsky B.V. Cytogenetic Characteristics of Seed Progeny of Scots Pine Plus Tree Clones in Karelia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-9-22

Funding: The research was funded from the federal budget to fulfil the state assignment of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (KarRC RAS) No. 0185-2019-0093.

Acknowledgments: We would like to express our gratitude to the staff of the Laboratory for Plant Biotechnology of the KarRC RAS and, in person, Candidate of Agriculture, Deputy Director for Science of the Forest Research Institute of the KarRC RAS S.A. Moshnikov and Researcher of the Laboratory for Boreal Forest Dynamics and Production V.A. Kharitonov for their assistance in collecting the field material. We are grateful to the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources for the provision of *Triticum aestivum* seeds and the Diaem Company for the opportunity to carry out the research on an Attune NxT Flow Cytometer (Thermo Fisher Scientific).

Keywords: *Pinus sylvestris*, forest seed orchards, chromosomal abnormalities, DNA content, mitosis pathologies.

Введение

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является одной из основных лесообразующих пород бореальной зоны Евразии и имеет высокую хозяйственную ценность. Огромный по площади интразональный непрерывный ареал данного вида, популяции которого произрастают в различных почвенно-климатических условиях, способствует проявлению процессов внутривидовой дифференциации [23]. Сосновые леса занимают почти 65 % площади лесного фонда Республики Карелии и играют в этом регионе важнейшую эколого-экономическую роль [2]. Для обеспечения их искусственного восстановления в последней трети XX столетия в Республике Карелии было создано 6 прививочных лесосеменных плантаций (ЛСП) I порядка общей площадью ~ 365 га [12]. ЛСП закладывали вегетативными (клоновыми) потомствами лучших (плюсовых) деревьев, отобранными в естественных насаждениях сосны обыкновенной по фенотипу. Многолетние исследования вегетативного роста, репродуктивной активности, габитуального и генетического разнообразия плюсовых деревьев (ПД) и плюсовых насаждений (ПН) *P. sylvestris* [10–12, 26, 28] показали, что более 90 % выявляемого генетического разнообразия у сосны обыкновенной концентрируется внутри популяций. Полученный результат подчеркивает важность исследования генетического разнообразия на внутригрупповом (индивидуальном) уровне.

В 2007–2011 гг. была проведена комплексная селекционно-генетическая оценка [26, 27] 72 клоновых потомств сосны обыкновенной (по 5 нормально развитых рамет на каждый клон), которые произрастали в пределах одного

поля Петрозаводской ЛСП I, заложенного в 1982–1984 гг. Отобраны 7 лучших клонов в качестве кандидатов в элитные ПД, пригодных в дальнейшем для создания ЛСП повышенной генетической ценности.

Для выявления на ранних этапах развития растений различных патологий, когда еще отсутствуют их фенотипические проявления, применяют цитогенетический анализ [4] – один из самых эффективных способов оценки влияния неблагоприятных экологических факторов на организм [5, 14]. Считается, что наиболее информативные критерии цитогенетического анализа хвойных растений – число хромосом, хромосомные мутации и патологии митоза [30, 37]. Причем одними из самых чувствительных к воздействию внешней среды являются репродуктивные органы голосеменных растений в связи с длительным циклом развития семян [8].

Многочисленные исследования позволили выявить у вида *P. sylvestris* различные хромосомные нарушения и патологии митоза [3, 4, 7, 13, 14, 16, 17, 19, 29, 32]. Так, у представителей данного вида, произрастающих в экстремальных условиях, зарегистрированы кольцевые и полицентрические хромосомы, делеции, фрагменты и другие аномалии [18, 19]. В ряде исследований отмечаются разнообразные нарушения митоза на стадии ана-телофазы: многополюсность, мосты, забегание, отставание, фрагментация хромосом и др. [14, 17].

Стоит отметить, что на территории Северо-Запада России изучение цитогенетической системы хвойных растений на ЛСП не проводилось. Тогда как исследования данного рода необходимы при отборе ПД, оценке состояния древостоев и качества семян, а также для определения перспектив интродукции видов и создания искусственных насаждений в конкретных почвенно-климатических условиях [4, 30].

В настоящей работе представлены первые результаты цитогенетических исследований (определение относительного содержания ДНК, выявление хромосомных нарушений и патологий митоза) клонов плюсовых деревьев *P. sylvestris*, произрастающих на Петрозаводской ЛСП I порядка. В качестве контроля взяты нормальные деревья (НД) *P. sylvestris* из естественного соснового насаждения в Пряжинском районе Карелии.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в среднетаежной подзоне Карелии. Кандидаты в элитные ПД отобраны в результате комплексной селекционно-генетической оценки [26, 27] на Петрозаводской ЛСП I порядка (61,91972° с. ш.; 34,41389° в. д.). ЛСП (площадь 238 га) основана в 1976 г. [15] и расположена в 15 км от Петрозаводского городского округа вдали от крупных автотранспортных магистралей и окружена сосновыми и еловыми фитоценозами. Поле, на котором произрастают клоны ПД, закладывалось по рендомизированной схеме с расстоянием между деревьями 5×8 м вегетативным потомством ПД, отобранных в популяциях *P. sylvestris* в пределах Южнокарельского лесосеменного района [10]. В исследовании участвовали 5 из 7 кандидатов в элиту. В качестве контроля взяты 2 НД *P. sylvestris* из естественного соснового насаждения в Пряжинском районе Карелии (61,722118° с. ш.; 33,458897° в. д.). НД подбирали таким образом, чтобы по величине основных таксационных

параметров (возраст, высота, диаметр) они были близки к исследуемым клонам ПД (табл. 1).

Сбор семян, получение меристематических тканей. Сбор семян с НД и клонов ПД сосны обыкновенной осуществляли в феврале 2020 г. С верхних веток кроны каждого дерева отбирали по 5–8 шишек, которые в последующем раскладывали в помещении и сушили при комнатной температуре до полного раскрытия.

Для цитогенетического анализа использовали кончики корешков проросших семян, достигших длины 5–15 мм. Семена проращивали в чашках Петри на влажной двухслойной фильтровальной бумаге. Проанализировано не менее 20 проростков для каждого дерева.

Таблица 1

**Таксационные параметры нормальных деревьев и клонов плюсовых деревьев
*Pinus sylvestris***

| Селекционные категории | Номер дерева | Возраст, лет | Высота, м | Диаметр ствола на высоте 1,3 м, см |
|------------------------|--------------|--------------|-----------|------------------------------------|
| Клоны ПД | 516-4 | 37 | 13,4 | 25,1 |
| | 835-5 | 37 | 13,0 | 24,7 |
| | 856-4 | 37 | 13,6 | 25,4 |
| | 864-2 | 37 | 13,3 | 24,4 |
| | 876-1 | 37 | 13,2 | 24,6 |
| НД | 6 | 20 | 8,6 | 22,3 |
| | 7 | 25 | 9,3 | 22,7 |

Цитогенетические исследования деревьев сосны. Изучали следующие цитогенетические показатели: число хромосом, частоту и типы патологий митоза на стадиях метафазы, анафазы и телофазы (в процентах от общего числа делящихся клеток на тех же стадиях) [7, 17]. Кончики корешков фиксировали в спиртово-уксусной смеси (3 части 96 %-го этилового спирта и 1 часть ледяной уксусной кислоты) в течение суток [24, 25]. Для подсчета числа хромосом перед фиксацией материал обрабатывали 1 %-м водным раствором колхицина в течение 5 ч, окрашивали 1 %-м ацетогематоксилином, перед окрашиванием материал выдерживали 10–15 мин в 4 %-м растворе железоммонийных квасцов. Давленные препараты готовили по стандартным методикам [24]. Просмотр препаратов осуществляли при помощи микроскопа «Микмед-5» («Ломо», Россия).

Исследование содержания ДНК. Данные флюоресценции изолированных ядер детектировали при помощи проточного цитофлуориметра Attune NxT (Thermo Fisher Scientific, США). Молодую хвою семенного потомства измельчали лезвием в 500 мкл охлажденного раствора для окрашивания (FxCycle™ PI/RNase) и инкубировали 10 мин в темноте при комнатной температуре. Образцы фильтровали через нейлоновую мембрану с размером пор 50 мкм [31, 35]. В качестве стандарта для определения относительного содержания ДНК *P. sylvestris* использовали изолированные ядра *Triticum aestivum* L. сорта Chinese spring с известным содержанием ДНК: 2C = 30,9 пг [34].

Статистическую обработку полученных экспериментальных данных осуществляли в программе StatGraphics. Сравнение выборок проводили

с использованием критериев Манна–Уитни и Стьюдента, частные доли в дисперсионном комплексе сопоставляли с применением критерия Фишера [9, 22].

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ КарНЦ РАН и при поддержке научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

Результаты исследования и их обсуждение

Изменения в кариотипе у плюсовых и нормальных деревьев сосны обыкновенной. Представители семейства *Pinaceae* характеризуются одинаковым количеством хромосом ($2n = 24$) и выраженной однородностью кариотипа [36]. Исследование корневой меристемы семенного потомства НД и клонов ПД показало, что в диплоидном наборе содержится 24 хромосомы (рис. 1, *а*). У изученных растений обнаружены единичные анеуплоидные клетки ($2n = 23$; $2n = 25$). Чаще всего регистрировали моносомию ($2n = 23$) – 81 % от общего числа анеуплоидных клеток (рис. 1, *б*). Уменьшение числа хромосом до $2n = 23$ связано с присутствием в клетке дицентрической хромосомы [17, 19].

Анеуплоидные клетки образуются в результате нарушения митотического деления и отличаются по генетическому составу от исходных родительских [7]. Как правило, анеуплоидные клетки не проходят через митоз и быстро погибают. В изученной выборке большинство клеток являлось диплоидными, что свидетельствует о нормальной работе системы элиминации митотических аномалий.



Рис. 1. Метафазные пластинки клеток корневой меристемы проростков *Pinus sylvestris*: *а* – диплоидный набор хромосом ($2n = 24$); *б* – гипоанеуплоидный набор хромосом ($2n = 23$), дицентрическая хромосома. Увеличение: объектив – в 100 раз, окуляр – в 10 раз

Fig. 1. Metaphase plates of root meristem cells of *Pinus sylvestris* seedlings: *a* – diploid chromosome set ($2n = 24$); *b* – hypodiploid chromosome set ($2n = 23$), dicentric chromosome. Magnification: objective 100 \times , ocular 10 \times

Исследование содержания ДНК. Данные проточной цитометрии позволили определить относительное содержание ДНК в молодой хвое проростков *P. sylvestris*. Так, было установлено, что у клонов ПД диплоидные особи имеют средний уровень относительного содержания ДНК $42,07 \pm 0,21$ пг, тогда как НД содержат $42,95 \pm 0,04$ пг (табл. 2). Расчет статистической достоверности выявленного различия осуществлен двумя способами. В первом случае использован алгоритм, предложенный А.Н. Плохинским [22] для определения достоверности

разности при очень малых выборках. Разница между НД и клонами ПД по относительному содержанию ДНК оказалась статистически достоверной ($t_{\text{факт}} = 4,4$; $t_{\text{ст}} = 4,0$ при $p < 0,01$). Во втором случае применен критерий Манна-Уитни (U-test, $p < 0,01$) и подтвержден ранее сделанный вывод.

Полиплоидия в исследуемых образцах не выявлена, верность этого результата подтверждается и классическим методом кариотипирования. Похожие значения получены при исследовании относительного содержания ДНК *P. sylvestris*, произрастающих в лесных сообществах Балканского полуострова [33]. Так, было установлено: данный параметр у рассмотренных растений в среднем составляет $42,51 \pm 1,12$ пг. В работе J.P.T. Valkonen с соавторами [38] показано, что у диплоидных особей *P. sylvestris* в тканях хвои и корня относительное содержание ДНК – 52,25 пг. Однако в качестве внутреннего стандарта ученые использовали ядра, выделенные из листьев *Hordeum vulgare* L. сорта Sultan.

Таблица 2

Относительное содержание ДНК (2С) в молодой хвое проростков из семян *Pinus sylvestris*

| Селекционные категории | Количество образцов | Относительное содержание ДНК | | |
|------------------------|---------------------|---|----------------------|-------------------------|
| | | Минимальное / максимальное значение, пг | Среднее значение, пг | Коэффициент вариации, % |
| Клоны ПД | 15 | 41,09 / 43,41 | 42,09±0,17 | 1,61 |
| НД | 6 | 42,68 / 43,12 | 42,93±0,06 | 0,34 |

Изучение патологий митоза у исследуемых растений. Митотическое деление в большинстве клеток изученных растений проходило нормально с правильной ориентацией хромосом в метафазе и последующим расхождением их к полюсам. Число делящихся клеток на разных стадиях митоза (метафаза, анафаза, телофаза) в корешках проростков из семян клонов ПД в среднем составило $194,7 \pm 6,2$ шт., а у НД – $181,4 \pm 14,3$ шт. В результате анализа числа делящихся клеток в меристемах хвои *P. sylvestris* в «экологически чистом» районе г. Красноярска было установлено, что среднее количество таких клеток – $123,6 \pm 9,5$ шт. [7].

Частота патологий митоза является одним из наиболее информативных параметров, точно отражающим уровень повреждений ДНК и степень воздействия стрессовых факторов на состояние генеративной сферы *P. sylvestris* [1, 5, 20, 21]. Наше исследование показало, что в потомстве НД доля клеток с аномалиями митоза в среднем ~ в 1,5 раза больше, чем в потомстве клонов ПД ($3,44 \pm 0,32$ и $2,38 \pm 0,14$ % (U-test, $p < 0,05$) соответственно). Доля цитогенетических патологий в клетках корневой меристемы проростков *P. sylvestris* низка и не превышает пределов нормальных значений уровня спонтанного мутирования, который, согласно исследованиям Буториной с соавторами [5, 6], равняется 5 %. Примечательно, что растений без патологий митоза в изученной выборке обнаружено не было.

Выявлено 7 типов патологий митоза (табл. 3), которые можно условно разделить на 3 группы [14, 21]. К первой группе относятся структурные нарушения хромосом – фрагментация хромосом в метафазе и анафазе (рис. 2, а), мосты в ана-телофазае (рис. 2, б). Вторая группа – это геномные нарушения: забегание

хромосом в метафазе и анафазе (рис. 2, *в*), обособление хромосом и групп хромосом в метафазе и анафазе (рис. 2, *з*), отставание хромосом в анафазе (рис. 2, *д*), многополосность в ана-телофазе (рис. 2, *е*). Третья группа – сложные нарушения, сочетающие в себе структурные и геномные нарушения – мосты + забегание хромосом в анафазе (рис. 2, *ж*).

Таблица 3

Результаты исследований патологий митоза в соматической ткани *Pinus sylvestris* на стадиях метафазы и ана-телофазы митоза

| Тип патологии митоза | Распространенность патологии, % (Fd), для клонов ПД | | | | | | Суммарные значения, % для НД |
|----------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|
| | 516-4 | 876-1 | 856-4 | 835-5 | 864-2 | Суммарные значения | |
| <i>Метафаза</i> | | | | | | | |
| Забегание | 1,27 (2,3) | 0,20 (5,6) | 0,35 (4,1) | 0,26 (4,8) | 0,08 (8,9) | 0,39 (6,4) | 0,83 |
| Фрагментация | 0,35 (0,9) | 0 (3,0) | 0 (3,8) | 0 (3,2) | 0,08 (1,4) | 0,07 (3,2) | 0,22 |
| Обособление | 0 (5,8) | 0 (6,5) | 0 (8,2) | 0 (7,0) | 0 (7,4) | 0 (15,0) | 0,26 |
| <i>Ана-телофаза</i> | | | | | | | |
| Забегание | 2,79 (4,2) | 3,15 (3,4) | 4,07 (0,6) | 4,47 (0,1) | 5,23 (0,6) | 4,08 (1,1) | 4,64 |
| Фрагментация | 0 (3,4) | 0 (4,3) | 0,16 (0,9) | 0 (4,3) | 0 (5,0) | 0,04 (6,8) | 0,26 |
| Обособление | 0 (1,0) | 0 (1,2) | 0 (1,5) | 0,21 (1,3) | 0 (1,4) | 0,04 (1,0) | 0,11 |
| Отставание | 0,15 (3,1) | 0,11 (4,8) | 0,08 (6,9) | 0 (8,2) | 0 (9,5) | 0,06 (13,6) | 0,47 |
| Мосты | 0 (5,3) | 0,54 (0) | 0,08 (6,1) | 0,11 (4,4) | 0,34 (1,4) | 0,22 (5,6) | 0,58 |
| Многополосность | 0 (4,0) | 0 (5,0) | 0 (6,1) | 0 (5,0) | 0,08 (2,7) | 0,02 (9,4) | 0,26 |
| Мост + забегание | 0 (1,7) | 0,11 (0,5) | 0,08 (1,0) | 0,32 (0,6) | 0 (2,5) | 0,10 (1,3) | 0,21 |

Примечание: Fd – критерий Фишера для разности сравниваемых долей, при Fd = 3,8, p < 0,05; Fd = 6,6, p < 0,01; Fd = 10,8, p < 0,001. Жирным шрифтом выделены варианты, статистически достоверно отличающиеся от суммарных значений НД.

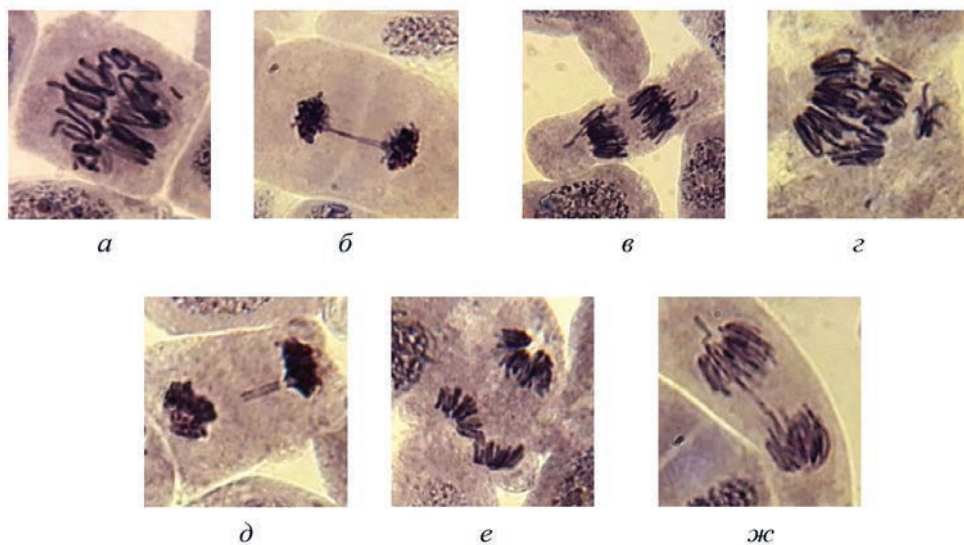


Рис. 2. Цитогенетические аномалии в клетках корневой меристемы проростков *Pinus sylvestris*: а – фрагментация хромосом; б – мост; в – забегание хромосом; г – обособление хромосом; д – отставание хромосом; е – многополюсный митоз; ж – мост + забегание хромосом. Увеличение: объектив – в 100 раз, окуляр – в 10 раз

Fig. 2. Cytogenetic abnormalities in root meristem cells of *Pinus sylvestris* seedlings: а – chromosome fragmentation; б – chromosome bridge; в – chromosome overlap; г – chromosome isolation; д – chromosome lagging; е – multipolar mitosis; ж – chromosome bridge + chromosome overlap. Magnification: objective 100×, ocular 10×

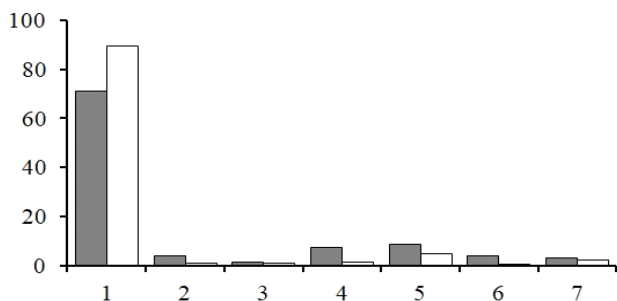


Рис. 3. Спектр нарушений митоза (%) на стадиях ана-телофазы у семенного потомства НД (серые столбики) и клонов ПД (белые столбики) сосны обыкновенной: 1 – забегание; 2 – фрагментация; 3 – обособление; 4 – отставание; 5 – мосты; 6 – многополюсность; 7 – сложные

Fig. 3. Spectrum of mitosis disorders (%) at the anaphase and telophase stages in the seed progeny of normal trees (gray columns) and clones of plus trees (white columns) of Scots pine: 1 – chromosome overlap; 2 – chromosome fragmentation; 3 – chromosome isolation; 4 – chromosome lagging; 5 – chromosome bridges; 6 – multipolar mitosis; 7 – complex abnormalities

Установлено, что на стадии ана-телофазы спектр патологий был значительно шире в отличие от стадии метафазы (см. табл. 3). При этом у большинства особей наиболее распространенной патологией являлось забегание хромосом, ее доля в общем спектре патологий митоза НД составляла 71 %, а у клонов ПД – 89 % (рис. 3). Такие изменения в клетке могут обуславливаться повреждением центромерного участка хромосомы [7] и приводить к потере части хромосомного материала у делящейся клетки [14]. Похожие данные получены в результате исследования семенного потомства *P. sylvestris* из Усманского бора (средний возраст насаждений – 80 лет) Воронежской области, где на долю данного типа патологий из общего спектра приходилось 49 % [17]. Частота патологий митоза у этих растений в среднем составляет 0,8 %. Исследователи отмечают, что лесорастительные условия Усманского бора можно считать оптимальными для нормального роста и развития *P. sylvestris*.

Сравнение частных долей [22] различных типов патологий митоза между двумя общими выборками НД и клонов ПД показало, что они значительно отличаются по следующим аномалиям митоза: забегание и обособление хромосом в метафазе, фрагментация, отставание, мосты и многополюсность в ана-телофазе (см. табл. 3).

Заключение

Полученные данные дополняют и расширяют сведения о цитогенетической системе *Pinus sylvestris* в таежных экосистемах европейской части России. В результате проведенных исследований стало очевидно, что в большинстве клеток сосны митоз протекает нормально, а основным типом патологий является забегание хромосом. Низкая доля клеток, имеющих аномалии митоза, присутствие в изученном материале единичных анеуплоидных клеток и стабильное значение относительного содержания ДНК свидетельствуют о нормальной работе системы элиминаций митотических аномалий. Поскольку система репарации защищает геном только до определенного уровня воздействия мутагенного фактора, можно предположить, что антропогенная нагрузка на экосистемы изученных районов невысока.

В корневой меристеме семенного потомства клонов плюсовых деревьев доля аномальных клеток и частота встреч разнообразных типов патологий меньше, чем у нормальных деревьев. Таким образом, изученные семена *P. sylvestris* с Петрозаводской ЛСП I порядка являются цитогенетически стабильными и могут служить посадочным материалом, а 5 клонов – плюсовыми деревьями для создания ЛСП полуторного и II порядков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аминева Е.Ю. Индивидуальная изменчивость сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) по признаку засухоустойчивости: автореф. дис. ...канд. с.-х. наук. Воронеж, 2018. 22 с. Amineva E.Yu. *Individual Variability of Scots Pine (Pinus sylvestris L.) by Drought Resistance*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 2018. 22 p.
2. Ананьев В.А., Мошников С.А. Структура и динамика лесного фонда Республики Карелия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 4. С. 19–29. Anan'ev V.A., Moshnikov S.A. Structure and Dynamics of the Forest Reserves of the Republic of Karelia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 4, pp. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.4.19>

3. Буторина А.К., Мозгалина И.Г. Особенности цитогенетических показателей сосны меловой и сосны обыкновенной // Экология. 2004. № 3. С. 185–189. Butorina A.K., Mozgalina I.G. Specific Cytogenetic Characteristics of *Pinus cretaceae* and *Pinus sylvestris*. *Ekologia* [Russian Journal of Ecology], 2004, no. 3, pp. 185–189. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:RUSE.0000025965.49968.1f>

4. Буторина А.К., Мурая Л.С., Исаков Ю.Н. Спонтанный мутагенез у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Первый случай обнаружения мутанта с кольцевой и добавочной хромосомами // Докл. Акад. наук СССР. 1979. Т. 248, № 4. С. 977–979. Butorina A.K., Muraya L.S., Isakov Yu.N. Spontaneous Mutagenesis in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). The First Case of Mutant Detection with Ring and Additive Chromosomes. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1979, vol. 248, no. 4, pp. 977–979.

5. Буторина А.К., Калаев В.Н., Вострикова Т.В., Мягкова О.Е. Цитогенетическая характеристика семенного потомства некоторых видов древесных растений в условиях антропогенного загрязнения г. Воронежа // Цитология. 2000. Т. 42, № 2. С. 196–201. Butorina A.K., Kalayev V.N., Vostrikova T.V., Myagkova O.E. Cytogenetic Characteristics of Seed Progeny of Some Woody Plant Species under Anthropogenic Pollution in Voronezh. *Tsitologiya*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 196–201.

6. Буторина А.К., Черкашина О.Н., Ермолаева О.В., Чернодубов А.И., Авдеева И.А. Цитогенетический мониторинг аутохтонных лесов Усманского и Хреновского боров // Изв. РАН. Сер.: Биологическая. 2007. № 4. С. 508–512. Butorina A.K., Cherkashina O.N., Ermolaeva O.V., Chernodubov A.I., Avdeeva I.A. Cytogenetic Monitoring of the Usmansky and Khrenovskoy Autochthonic Pine Stands. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya* [Biology Bulletin], 2007, no. 4, pp. 508–512. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359007040152>

7. Горячкина О.В., Сизых О.А. Цитогенетические реакции хвойных растений в антропогенно нарушенных районах г. Красноярска и его окрестностей // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30, № 1-2. С. 46–51. Goryachkina O.V., Sizykh O.A. Cytogenetic Responses of Coniferous Plants in Anthropogenically Disturbed Areas of Krasnoyarsk and Its Surroundings. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2012, vol. 30, no. 1-2, pp. 46–51.

8. Егоркина Г.И., Валетова Е.А. Цитогенетическое изучение сосны обыкновенной в городских лесах г. Бийска // Ползуновский вестн. 2004. № 2. С. 110–115. Egorkina G.I., Valetova E.A. Cytogenetic Study of Scots Pine in Urban Forests of Biysk. *Polzunovskiy vestnik*, 2004, no. 2, pp. 110–115.

9. Ивантер Э.В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: ПетрГУ, 2011. 304 с. Ivanter E.V., Korosov A.V. *Introduction to Quantitative Biology*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2011. 304 p.

10. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Сравнительная оценка генетического разнообразия естественных популяций и клоновых плантаций сосны обыкновенной и ели финской в Карелии // Экол. генетика. 2015. Т. XIII, № 4. С. 55–67. Ilinov A.A., Raevskiy B.V. Genetic Diversity Comparative Evaluation of *Pinus sylvestris* L. and *Picea × Fennica* (Regel) Kom. Native Populations and Clonal Seed Orchards in Russian Karelia. *Ekologicheskaya genetika* [Ecological genetics], 2015, vol. XIII, no. 4, pp. 55–67. DOI: <https://doi.org/10.17816/ecogen13455-67>

11. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Состояние генофонда сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в Карелии // Сиб. лесн. журн. 2016. № 5. С. 45–54. Ilyinov A.A., Raevsky B.V. The Current State of *Pinus sylvestris* L. Gene Pool in Karelia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 5, pp. 45–54. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160504>

12. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Использование микросателлитных локусов в изучении плюсового генофонда сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 6. С. 124–134. Ilinov A.A., Raevsky B.V. Analysis of the *Pinus sylvestris* L. Plus Tree Gene Pool in Karelia Using Microsatellite Loci. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS], 2018, no. 6, pp. 124–134. DOI: <https://doi.org/10.17076/eb840>

13. Калаев В.Н., Артюхов В.Г., Попов В.Н., Игнатова И.В. Цитогенетический полиморфизм семенного потомства сосны обыкновенной на востоке Воронежской области // Лесоведение. 2010. № 4. С. 56–65. Kalaev V.N., Artyukhov V.G., Popov V.N., Ignatova I.V. Cytogenetic Polymorphism of Pine Seeds in Eastern Voronezh Region. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2010, no. 4, pp. 56–65.
14. Калашиник Н.А. Хромосомные нарушения как индикатор оценки степени техногенного воздействия на хвойные насаждения // Экология. 2008. № 4. С. 276–286. Kalashnik N.A. Chromosome Aberrations as Indicator of Technogenic Impact on Conifer Stands. *Ekologia* [Russian Journal of Ecology], 2008, no. 4, pp. 276–286. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106741360804005X>
15. Лаур Н.В., Царев А.П. Лесосеменные плантации Карелии // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IV науч.-техн. конф. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С. 123–126. Laur N.V., Tsarev A.P. Forest Seed Plantations of Karelia. *Proceedings of the IV Scientific and Technical Conference "Forests of Russia: Policy, Industry, Science and Education"*. Saint Petersburg, POLITEKKh-PRESS Publ., 2019, pp. 123–126.
16. Машкина О.С., Калаев В.Н., Мурая Л.С., Леликова Е.С. Цитогенетические реакции семенного потомства сосны обыкновенной на комбинированное антропогенное загрязнение в районе Новолипецкого металлургического комбината // Экол. генетика. 2009. Т. VII, № 3. С. 17–29. Mashkina O.S., Kalaev V.N., Muraya L.S., Lelikova E.S. Cytogenetic Response of Seed Progeny of Scots Pine to Combined Anthropogenic Pollution in the Area of Novolipetsk Metallurgical Combine. *Ekologicheskaya genetika* [Ecological genetics], 2009, vol. VII, no. 3, pp. 17–29. DOI: <https://doi.org/10.17816/ecogen7317-29>
17. Машкина О.С., Тихонова И.В., Муратова Е.Н., Мурая Л.С. Цитогенетические особенности семенного потомства карликовых сосен на юге Восточной Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30, № 1-2. С. 127–135. Mashkina O.S., Tikhonova I.V., Muratova E.N., Muraya L.S. Cytogenetic Features of Seed Progeny of Dwarf Pines in Southern Eastern Siberia. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2012, vol. 30, no. 1-2, pp. 127–135.
18. Милютин Л.И., Муратова Е.Н., Ларионова А.Я. Развитие лесной генетики в России // Сиб. лесн. журн. 2018. № 1. С. 3–15. Milyutin L.I., Muratova E.N., Larionova A.Ya. Development of Forest Genetics in Russia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2018, no. 1, pp. 3–15. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20180101>
19. Муратова Е.Н., Седельникова Т.С. Геномные и хромосомные мутации у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в экстремальных условиях произрастания // Хвойные бореальной зоны. 2004. Вып. 2. С. 128–140. Muratova E.N., Sedel'nikova T.S. Genome and Chromosomal Mutations in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) under Extreme Environmental Conditions. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2004, iss. 2, pp. 128–140.
20. Пардаева Е.Ю., Машкина О.С., Кузнецова Н.Ф. Состояние генеративной сферы сосны обыкновенной как биоиндикатора устойчивости лесов на территории Центрально-Черноземного района в связи с глобальным изменением климата // Тр. СПбНИИЛХ. 2013. № 2. С. 16–21. Pardayeva E.Yu., Mashkina O.S., Kuznetsova N.F. State of Generative Sphere of Scots Pine as a Bioindicator of Forest Stability in the Central Black Earth Region in Connection with Global Climate Change. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute], 2013, no. 2, pp. 16–21.
21. Пардаева Е.Ю., Машкина О.С., Кузнецова Н.Ф., Попов В.Н. Оценка чувствительности цитогенетических показателей к воздействию погодного и техногенного факторов стресса на примере *Pinus sylvestris* L. // Организация и регуляция физиолого-биохимических процессов. Воронеж: Централ.-чернозем. кн. изд-во, 2013. С. 148–155.

Pardayeva E.Yu., Mashkina O.S., Kuznetsova N.F., Popov V.N. Assessment of Sensitivity of Cytogenetic Indices to Weather and Anthropogenic Stress Factors on the Example of *Pinus sylvestris* L. *Organization and Regulation of Physiological and Biochemical Processes*. Voronezh, Tsentral'no-chernozemnoye knizhnoye izdatel'stvo, 2013, pp. 148–155.

22. Плохинский Н.А. Биометрия. М.: МГУ, 1970. 367 с. Plokhinskiy N.A. *Biometrics*. Moscow, MGU Publ., 1970. 367 p.

23. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 192 с. Pravdin L.F. *Scots Pine. Variability, Intraspecific Systematics and Selection*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 192 p.

24. Правдин Л.Ф., Бударагин В.А., Круклис М.В., Шершукова О.П. Методика кариологического изучения хвойных пород // Лесоведение. 1972. № 2. С. 67–75. Pravdin L.F., Budaragin V.A., Krukliis M.V., Shershukova O.P. Methodology of Karyological Study of Conifers. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1972, no. 2, pp. 67–75.

25. Пухальский В.А., Соловьев А.А., Бадаева Е.Д., Юрцев В.Н. Практикум по цитологии и цитогенетике растений. М.: КолосС, 2007. 198 с. Pukhal'skiy V.A., Solov'yev A.A., Badayeva E.D., Yurtsev V.N. *Workshop on Plant Cytology and Cytogenetics*. Moscow, KolosS Publ., 2007. 198 p.

26. Раевский Б.В. Селекция и семеноводство сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm) на северо-западе таежной зоны России: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Петрозаводск, 2015. 43 с. Raevsky B.V. *Breeding and Seed Production of Scots Pine (Pinus sylvestris L.) and Twisted Pine (Pinus contorta Dougl. ex Loud. var. latifolia Engelm) in the North-West of the Russian Taiga Zone*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Petrozavodsk, 2015. 43 p.

27. Раевский Б.В., Щурова М.Л. Методика селекционно-генетической оценки клонов сосны обыкновенной на лесосеменных плантациях // Сиб. лесн. журн. 2016. № 5. С. 91–98. Raevsky B.V., Schurova M.L. The Method for Breeding and Genetic Assessment of Scotch Pine Clones at Forest Seed Orchards. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 5, pp. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160509>

28. Раевский Б.В., Куклина К.К., Щурова М.Л. Селекционно-генетическая оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии // Тр. КарНЦ РАН. № 3. 2020. С. 45–59. Raevsky B.V., Kuklina K.K., Schurova M.L. Genetic and Breeding Assessment of Scots Pine Plus Trees in Karelia. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS], 2020, no. 3, pp. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.17076/eb1163>

29. Седельникова Т.С. Дифференциация болотных и суходольных популяций видов семейства *Pinaceae* Lindl. (репродуктивные и кариотипические особенности): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск., 2008. 35 с. Sedel'nikova T.S. *Differentiation of Swamp and Dry Meadow Populations of the Pinaceae Lindl. Family Species. (Reproductive and Karyotypic Features)*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Tomsk, 2008. 35 p.

30. Седельникова Т.С. Цитогенетический мониторинг хвойных как индикатор уровня экстремальности экосистем // Промышленная ботаника. 2014. Вып. 14. С. 54–60. Sedel'nikova T.S. Cytogenetic Monitoring of Populations of Conifers as an Indicator of Ecosystems Extreme Level. *Promy'shlennaya botanika* [Industrial Botany], 2014, iss. 14, pp. 54–60.

31. Скапцов М.В., Смирнов С.В., Куцев М.Г. Содержание ядерной ДНК в некоторых сортах растений, используемых в качестве внешних стандартов в проточной цитометрии // Turczaninowia. 2014. Т. 17, № 3. С. 72–78. Skaptsov M.V., Smirnov S.V., Kutsev M.G. Nuclear DNA Content in Some Plant Kinds Used as an External Standard in Flow Cytometry. *Turczaninowia*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.17.3.8>

32. Шафикова Л.М., Калашник Н.А. Характеристика кариотипа сосны обыкновенной при промышленном загрязнении // Лесоведение. 2000. № 2. С. 30–36.

Shafikova L.M., Kalashnik N.A. Characteristics of the Karyotype of Scots Pine under Industrial Pollution. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2000, no. 2, pp. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.1002/jppr200030136>

33. Bogunic F., Muratovic E., Brown S.C., Siljak-Yakovlev S. Genome Size and Base Composition of Five *Pinus* Species from the Balkan Region. *Plant Cell Reports*, 2003, vol. 22, iss. 1, pp. 59–63. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-003-0653-2>

34. Bogunić F., Siljak-Yakovlev S., Muratović E., Pustahija F., Medjedović S. Molecular Cytogenetics and Flow Cytometry Reveal Conserved Genome Organization in *Pinus mugo* and *P. uncinata*. *Annals of Forest Science*, 2011, vol. 68, iss. 1, pp. 179–187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0019-9>

35. Doležel J., Greilhuber J., Lucretti S., Meister A., Lysák M.A., Nardi L., Obermayer R. Plant Genome Size Estimation by Flow Cytometry: Inter-Laboratory Comparison. *Annals of Botany*, 1998, vol. 82, iss. suppl_1, pp. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a010312>

36. Hizume M. Karyomorphological Studies in the Family *Pinaceae*. *Memoirs of the Faculty of Education, Ehime University. Series III, Natural science*, 1988, vol. 8, no. 2, pp. 1–108.

37. Sedel'nikova T.S., Muratova E.N., Pimenov A.V. Variability of Chromosome Numbers in Gymnosperms. *Biology Bulletin Reviews*, 2011, vol. 1, iss. 2, pp. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079086411020083>

38. Valkonen J.P.T., Nygren M., Ylönen A., Mannonen L. Nuclear DNA Content of *Pinus sylvestris* (L.) as Determined by Laser Flow Cytometry. *Genetica*, 1994, vol. 92, iss. 3, pp. 203–207. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00132539>

УДК 630*28:630*89

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-23-35

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ БЕРЕЗНЯКОВ*А.В. Грязькин, д-р биол. наук, проф.; Researcher ID: C-6699-2018,*ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>*Тхань Чунг Чан, аспирант; ResearcherID: ABB-4415-2021,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0728-3547>*Хунг Ву Ван, аспирант; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3707-8605**А.Н. Прокофьев, аспирант; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8229-7148**Минь Ань Хоанг, аспирант; Researcher ID: ABB-5138-2021,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-803X>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, просп. Институтский, д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021;

e-mail: lesovod@bk.ru, andreipro@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 24.04.20 / Принята к печати 11.08.20

Аннотация. Цель исследования – комплексная оценка ресурсов лесного участка, депонированных в березняке черничном. Актуальность работы обусловлена возрастающим интересом стран и регионов к многообразию ресурсов лесных экосистем. Впервые дана материально-денежная оценка основных видов ресурсов лесного участка с березовым древостоем. Состав древостоя: 65Б21Е8Ос3Ол_2В1Кл. Его относительная полнота – 0,6, класс бонитета – II, запас древостоя – 344 м³/га. При комплексной оценке учитывали пищевые и лекарственные ресурсы, древесину и лесохимическое сырье, медоносы и березовый сок, продукцию хозяйственно-бытового назначения. Оценку состава и запасов ресурсов лесного участка проводили на круговых учетных площадках по 10 м² в соответствии с патентом РФ № 2084129. Запасы промысловых видов пищевых, технических и лекарственных растений устанавливали методом укусов, ягод – одноразовым сбором в период созревания, сокопродуктивность березняка – опытным путем с учетом характеристик древостоя. Цены по всем видам ресурсов брали по состоянию на 2019 г. Показано, что стоимость древесины на лесном участке составляет около 15 % (200 840 р./га) от общей стоимости других, учтенных видов ресурсов, т. е. всего 2643 р./га. в пересчете на один год. По запасу преобладает дровяная древесина – более 36 %. Доля деловой древесины – 34 %. Сокопродуктивность березняка – превышает 12 тыс. л/га за сезон. При средней стоимости березового сока 20 р./л доход от реализации сезонного объема сока с 1 га может составить более 257 тыс./р. Наибольший удельный вес по сумме выручки занимает побочная продукция леса – от 70 до 85 % в зависимости от сезона года. Доля пищевых и лекарственных растений – около 10 %. Суммарный доход от реализации учтенных видов ресурсов данного лесного участка оценивается в 1,2 млн р./га. При этом следует учитывать важнейшую особенность такого рода ресурсов – способность самовозобновляться без участия человека. Основные виды ресурсов в березняке пригодны для ежегодной разработки в течение всего срока лесовыращивания. Полученными результатами можно руководствоваться при составлении договора аренды и проекта освоения лесного участка в тех случаях, когда предполагается комплексное использование ресурсов леса или их отдельных видов.

Для цитирования: Грязькин А.В., Чан Чунг Тхань, Ву Ван Хунг, Прокофьев А.Н., Хоанг Минь Ань. Комплексная оценка сырьевых ресурсов березняков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 23–35. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-23-35

Ключевые слова: лесной участок, березняк, сырьевые ресурсы леса, комплексное использование древесины, материально-денежная оценка лесных ресурсов.

INTEGRATED ASSESSMENT OF RAW MATERIAL RESOURCES OF BIRCH FORESTS

Anatoly V. Gryazkin, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: C-6699-2018,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

Thanh Tran Trung, Postgraduate Student; ResearcherID: ABB-4415-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0728-3547>

Hung Vu Van, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3707-8605>

Andrey N. Prokof'yev, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8229-7148>

Minh An Hoang, Postgraduate Student; ResearcherID: ABB-5138-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3025-803X>

Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, liter U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: lesovod@bk.ru, andreipro@yandex.ru

Original article / Received on April 24, 2020 / Accepted on August 11, 2020

Abstract. The research is aimed at a comprehensive assessment of the forest site resources deposited in a birch blueberry forest. The relevance of the work is based on the increasing interest of countries and regions in the diversity of forest ecosystem resources. A material and financial assessment of the major types of resources of the forest site with a birch stand is given for the first time. The stand composition is as follows: birch, 65 %; spruce, 21 %; aspen, 8 %; alder, 3%; elm, 2 %; and maple, 1 %. The stand is described by the following parameters: the relative density – 0.6; the quality class – II; and the growing stock – 344 m³/ha. Food and medicinal resources, wood and forest chemical raw materials, honey plants and birch sap, and household products were taken into account in the comprehensive assessment. The composition and reserves of the forest site reserves were assessed on the 10 m² circular survey plots in accordance with the patent no. RU 2084129 C1 “Seedling Growth Registering Method”. The commercial species reserves of edible, technical and medicinal plants were estimated using the mowing method; berries – by a single collection during the ripening period. The sap production of the birch forests was determined empirically, based on the stand parameters. The prices for all types of resources were used as of 2019. It is shown that the cost of timber on the forest site is about 15 % (200,840 rub/ha) of the total cost of the other recorded types of resources, i.e. totally 2,643 rub/ha in terms of one year. The stock is dominated by firewood – over 36 %; the share of industrial wood is 34 %. The sap productivity of the birch forest is more than 12 tns L/ha per season. With an average birch sap cost of 20 rub/L, the income from the sale of seasonal sap volume per 1 ha can be more than 257 tns rub. By-products account for the largest share of revenue, ranging from 70 to 85 % depending on the season of the year. The share of edible and medicinal plants is about 10 %. The total income from the sale of the recorded types of resources of this forest site is estimated to be 1.2 mln rub/ha. The most important feature of this kind of resources is their ability to regenerate themselves without human participation. The main types of resources in the birch forest can be used annually during the entire period of reforestation. The obtained results can be used when drafting an agreement on the lease and a project for the development of a forest site where integrated utilization of forest resources or their individual types is assumed.

For citation: Gryazkin A.V., Tran Trung Thanh, Vu Van Hung, Prokof'yev A.N., Hoang Minh An. Integrated Assessment of Raw Material Resources of Birch Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 23–35. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-23-35

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

Keywords: forest plot, birch forest, raw material resources of forest, integrated use of wood, material and financial assessment of forest resources.

Введение

Интерес к разнообразию лесных ресурсов в последние десятилетия возрастает. Об этом можно судить по многочисленным публикациям и широкой географии объектов исследования: Кавказ [1], Северо-Запад РФ [3–5, 11, 12], Поволжье [13], Урал [8]. Недревесные ресурсы леса широко используются не только в России, но и во многих других государствах: в Индии [22, 24], Бразилии [25], Непале [20], странах Южной Европы [19], во Вьетнаме и в других странах тропического пояса [15, 21], в Пакистане [23], Гондурасе, на Филиппинах [27], в Канаде [16], Болгарии [29].

Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО ООН) проводит ежегодные конференции и издает журнал «Non-wood Forest Products», в котором освещаются основные достижения и проблемы использования ресурсов леса в разных странах и на разных континентах [17–19, 26, 28, 30].

Устойчивое управление лесами – это система мер, направленных на обеспечение непрерывного неистощительного многоцелевого лесопользования, сохранение и повышение производительности, устойчивости и биологического разнообразия лесов. Реализация этой системы мер позволит увеличить вклад лесной отрасли в экономику страны, что предписано и Стратегией развития лесного комплекса РФ до 2030 г. [10]. Осуществляются шаги, способствующие повышению экономической эффективности лесопромышленного комплекса, обеспечивающие рост доходов федерального и региональных бюджетов. Общий объем выручки предприятий лесной отрасли в России в 2016 г. составил 1,4 трлн р., а их вклад в ВВП страны – 0,5 %. Поставлена задача увеличения вклада данной отрасли в ВВП до 1,0 % к 2030 г. [10].

На сегодняшний день слабо изученными остаются многие аспекты рационального использования ресурсов лесного фонда: география распределения ресурсов, методы их оценки, состав и структура в зависимости от характеристик основных компонентов лесных экосистем, урожайность и запасы по категориям земель лесного фонда. Наименее проработанное направление лесопользования – комплексная оценка разнообразия ресурсов на отдельно взятом лесном участке с учетом его особенностей. На это обращают внимание как отечественные, так и зарубежные исследователи [1, 2, 6–8, 10, 14, 17–19, 21–25, 27, 28].

В руководстве, разработанном сотрудниками ВНИИЛМ, акцент делается на виды, которые имеют хозяйственное значение [7]. Ю.В. Лебедев с соавт. при оценке ресурсов леса предлагают применять коэффициенты дисконтирования [8]. Такую методику расчетов можно использовать при планировании на 1–3 года, а на 10–30 лет, и тем более на весь период лесовыращивания, не имеет смысла т. к. лесная экосистема – система динамичная, поэтому точные прогнозы становятся невозможными уже за пределами 5-летнего периода. Нами предпринята попытка комплексной оценки ресурсов конкретного лесного участка на основе реальных данных.

Цель работы – дать комплексную оценку структуры и запасов основных видов ресурсов лесного участка в условиях северо-запада России на примере березняка черничного. Актуальность темы обусловлена возрастающим интересом к экологически чистой продукции, депонированной в лесах.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран березняк черничный в возрасте спелости с известными координатами произрастания. Основные характеристики березняка представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики древостоя на объекте исследования

| Характеристика | Значение |
|---|---------------------------------|
| Тип леса | Березняк черничный |
| Тип условий местопроизрастания по П.С. Погребняку | (В-С)2 |
| Состав | 65Б21Е8Ос3Ол _с 2В1Кл |
| Относительная полнота | 0,60 |
| Сомкнутость полога, % | 0,73 |
| Средний возраст, лет | 76 |
| D_{cp} , см | 27,7 |
| H_{cp} , м | 27,0 |
| Класс бонитета | II |
| Запас стволовой древесины, м ³ /га | 344,0 |

Примечание: D_{cp} – средний диаметр на высоте 1,3 м; H_{cp} – средняя высота; (В-С)2 – относительно бедные (В) и относительно богатые (С) почвы, свежие (2) по режиму увлажнения.

Запасы древесины устанавливали посредством сплошного перече́та деревьев. Одновременно фиксировали наличие и размеры капов и чаги на стволах. Для оценки количества ветвей в кроне, запасов древесной зелени и бересты отобрано по три учетных дерева, полученные результаты опубликованы в [3, 5].

Оценку урожайности ягод и запасов ресурсных видов проводили на круговых учетных площадках радиусом 1,785 м по оригинальной методике [2]. Всего было заложено 36 учетных площадок. На каждой из них учитывали все виды в составе живого напочвенного покрова, подроста и подлеска, определяли встречаемость и проективное покрытие. У подроста и подлеска измеряли высоту и оценивали жизненное состояние, численность и видовой состав. Запасы промысловых видов растений устанавливали методом укусов, урожайность ягод – одноразовым сбором в период созревания.

Интенсивность соковыделения и сокопродуктивность березняка определяли опытным путем, при этом учитывали размеры и возраст деревьев, а также характеристики древостоя. Для этой цели проводили подсочку берез в течение всего периода соковыделения, отбирая из преобладающих ступеней толщины не менее трех деревьев. Результаты опубликованы в [4, 12].

Цены по видам ресурсов использовали по состоянию на 2019 г. На лекарственные растения цены принимались равными 50 % от средней розничной цены по каждому виду с учетом влажности сырья (информация о ценах на лекарственные травы и лекарственное сырье получена через официальную программу «Поиск и заказ лекарств в аптеках Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Единая справочная служба "ЭКМИ"»). Цены на ягоды принимались среднерыночные, на древесину – усредненные цены ООО «ТрансЛес» и ООО «ХаслахерЛес».

Невесомые, или несырьевые ресурсы леса (рекреация, кислородопродуктивность, аэроионная способность и фитонцидная активность древесных пород) не оценивались, т. к. до настоящего времени не разработаны методы их учета.

Не оценивали и большую часть недревесных лесных ресурсов, к которым по лесному законодательству (ст. 32 Лесного кодекса РФ) относятся: пни, береста, кора деревьев и кустарников, хворост, веточный корм, еловая, пихтовая, сосновая лапы, ели для новогодних праздников, мох, лесная подстилка, камыш, тростник и другие подобные лесные ресурсы. С 1 января 2019 г. к недревесным лесным ресурсам отнесен и валежник (ФЗ № 77 от 18.04.2018). Его запасы также не определяли.

Результаты исследования и их обсуждение

Древостой на опытном участке имеет смешанный состав. Численность деревьев по породам и их основные характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средние характеристики по древесным породам на опытном объекте

| Характеристика | Порода | | | | | | | Итого |
|-----------------------|--------|------|-------|-------|------|------|--------|-------|
| | береза | ель | осина | ольха | клен | вяз | рябина | |
| Численность, экз./га | 252 | 152 | 72 | 8 | 12 | 20 | 196 | 712 |
| $D_{ср}$, см | 27,7 | 18,2 | 37,1 | 10,0 | 8,0 | 13,6 | 8,2 | 20,4 |
| $H_{ср}$, м | 27,0 | 17,7 | 25,4 | 8,1 | 6,3 | 8,8 | 6,1 | 18,0 |
| M, м ³ /га | 205,0 | 35,0 | 99,0 | 0,3 | 0,2 | 1,3 | 3,2 | 344,0 |

Примечание: M – запас древесины.

Результаты товарно-денежной оценки древесины в березняке черничном показывают, что из 344 м³/га общего запаса 118 м³/га относится к деловой, 102 м³/га – к полуделовой и 124 м³/га – к дровяной древесине. Суммарная стоимость древесины, депонированной в данном березняке, составляет 200 840 р./га.

По результатам обработки модельных деревьев установлено, что в зависимости от размеров дерева и степени развития кроны на одной березе насчитывается от 25 до 40 ветвей разного размера, в среднем – 32 ветки. Из них 11 ветвей имеют диаметр в верхнем отрубе 5 см и более. Такие ветки пригодны для изготовления кольев длиной до 1,2 м. Стоимость 100 колея указанного размера составляет 2300 р., отсюда, общая сумма от реализации колея равна 63 756 р./га.

На одной ветке в среднем насчитывается 350±28 листьев. Масса 100 шт. составляет 52,2±4,5 г. В кроне одного дерева содержится примерно 5,846 кг листьев. В Санкт-Петербурге и Ленинградской области через сеть фитоаптек березовый лист реализуется в упаковках по 50 и 100 г. Средняя стоимость 1 кг этого товара – 300 р. Следовательно, суммарная стоимость листьев будет 441 958 р./га.

Обобщение данных по модельным деревьям показывает, что масса соковой бересты на одном стволе в среднем равна 3,732 кг [3, 5]. Стоимость 1 кг соковой бересты в среднем составляет 230 р., а общая – 216 307 р./га. При этом ошкоровочной бересты (такая береста получается при механизированном способе

заготовки с использованием специальных окорочных станков) получают на 30 % больше, но ее цена на 50 % меньше, чем соковой бересты. Следовательно, общая стоимость ошкуровочной бересты может равняться 144 095 р./га.

Кору древесных пород возможно использовать также для получения дегтя и его производных (осина и береза), дубителей (вяз, ель, ольха) и красителей (вяз, клен, ольха, рябина).

В летний период на лесосеке после обрубки сучьев и ветвей заготавливают березовые веники. На один веник расходуется примерно две ветки, т. е. с одного дерева реально получить 16 веников. Средняя цена одного веника – 60 р. Общая стоимость такой продукции – 241 920 р./га.

При сплошной рубке в зимние месяцы из веток после обрубки сучьев изготавливают метелки для хозяйственных нужд. На одну метлу расходуется в среднем три ветки. Средняя цена одной метлы – 35 р. Из порубочных остатков в данном березняке можно сделать 2688 метелок на общую сумму 94 080 р./га.

Летом ветки большинства древесных пород заготавливают как веточный корм. При средней массе одной ветки 0,36 кг (облиственная часть равна массе одного растения из подроста) общая масса веточного корма из лиственных пород (508 дер./га) составит 5852 кг/га. Стоимость 1 т веточного корма – 1800 р., а его общая стоимость – 10 534 р./га.

Еловый лапник можно использовать как древесную зелень для производства ценных видов продукции. В соответствии с данными, опубликованными ранее [2], связь массы растущих ветвей ели с размерами дерева выражается следующим уравнением:

$$M = aD^2H,$$

где a – коэффициент, равный 0,0025; $D_{cp} = 18,200$ см; $H_{cp} = 17,700$ м.

Исходя из этого выражения масса древесной зелени в кроне ели (хвоя + побеги диаметром до 5 мм) составит: $0,0025 \cdot (18,200)^2 \cdot 17,700 = 14,6$ кг. Общие запасы древесной зелени – $14,6$ кг · 152 дер./га = 2219 кг/га. Стоимость 1 т в среднем – $6,5$ тыс./р. Общая стоимость древесной зелени из ели на данном участке – $14 424$ р./га.

При вырубке березы в осенне-зимний период с ее ветвей заготавливают березовые почки, которые применяют в качестве лекарственного сырья. Масса 1000 почек в среднем составляет $49,3 \pm 6,4$ г. Количество почек примерно равно количеству листьев. Стоимость березовых почек – 700 р./кг, а стоимость всего сырья – $97 370$ р./га.

На стволах березы и рябины встречается трутовик скошенный, или чага (*Inonotus obliquus* L.). В пределах пробной площади общая масса чаги на шести стволах березы диаметром от 29 до 42 см составляет около 7 кг. На трех стволах рябины диаметром 11 и 17 см также есть чага, общая масса плодовых тел этого трутовика на стволах рябины – примерно 1,5 кг.

Кроме чаги на четырех стволах березы присутствуют капы разного размера: от 10 до 23 см в диаметре и до 10 см высотой. Общая масса выявленных капов – более 6 кг. Эти значения переводим на 1 га и получаем: чаги примерно 17 кг/га, а капов – более 12 кг/га. Рыночная стоимость чаги как лекарственного сырья составляет в среднем 250 р./кг (за весь объем – 4250 р./га), а капов как сырья для производства художественных изделий – в среднем 170 р./кг (за весь объем – 2040 р./га). В итоге от реализации чаги и капов можно получить доход в 6290 р./га.

В березняках на всей территории России издавна заготавливают березовый сок. На опытном участке из 252 деревьев на 1 га березовый сок можно заготавливать с 202 деревьев, т. к. остальные деревья на этом участке не пригодны для подсочки по разным причинам: диаметр ствола менее установленного правилами [9], некоторые деревья относятся к фаутным и усыхающим. Исходя из данных, представленных в табл. 2, и с учетом требований [9] общее количество подсочных каналов составит 534 канала/га.

По результатам опытной подсочки средняя интенсивность соковыделения одним подсочным каналом – 1,9 л за сутки. Многолетние наблюдения за сокопродуктивностью березняков показывают, что выделение сока в данных условиях продолжается в среднем 12 сут. [4, 12]. За один сезон в березняке черничном можно приготовить следующий объем сока: 534 канала · 1,9 л × 12 сут. = 12 175 л сока/га. При средней цене 20 р./л доход от реализации данного товара может ежегодно составлять 243 504 р./га, что на 43 тыс. р. больше, чем доход от реализации древесины, которую нужно выращивать примерно 76 лет: в среднем за 1 год продажа древесины приносит немногим более 2,6 тыс. р./га (200 840 р./76 лет = 2642 р./га).

Подрост под пологом древостоя представлен лесообразующими породами, которые участвуют в формировании верхнего яруса. Состав подроста – 41Ол₂₀Кл₁₆В₁₄Ос₉Е. Его численность по породам следующая: вяз – 584 экз./га; ель – 332 экз./га; клен – 751 экз./га; ольха – 1502 экз./га; осина – 500 экз./га. Общая численность подроста – 3667 экз./га.

Фитомасса, накопленная в подросте, используется в качестве веточного корма или в качестве сырья для производства хвойно-витаминной муки. С учетом количества растений (3667 экз./га), средней высоты одного растения (1,2 м) и его средней массы (0,36 кг) общий запас древесной зелени из подроста составит около 1,32 т/га. Веточный корм можно реализовать по цене сена первого сорта – по 1800 р./т, следовательно, общая стоимость веточного корма из подроста будет 2376 р./га.

Подлесок под пологом березняка черничного представлен следующими видами: рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteum* L.), ива козья (*Salix caprea* L.), крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), волчегонник обыкновенный (*Daphne mezereum* L.), калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.). Густота подлеска на опытном участке превышает 4 тыс./га. Состав подлеска – 65Ря₆₂₃Круш₁₀Кал₂Чер₂Волч. Его видовой состав и численность представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Численность подлеска под пологом березняка
черничного, экз./га**

| Порода | Количество |
|--------------------------|------------|
| Волчегонник обыкновенный | 83 |
| Жимолость обыкновенная | 322 |
| Ива козья | 2574 |
| Калина обыкновенная | 415 |
| Крушина ломкая | 914 |
| Рябина обыкновенная | 2574 |
| Черемуха обыкновенная | 83 |
| <i>Итого</i> | 4401 |

Как и подрост, подлесок применяется в качестве веточного корма. С учетом общего количества растений, пригодных для веточного корма, – 3404 экз./га (волчегодник и крушину в состав веточного корма включать нельзя, т. к. эти виды ядовиты для скота), средней высоты подлеска (1,9 м) и средней массы веточного корма с одного растения (0,66 кг) общая фитомасса составит 2,25 т/га. Итоговая сумма выручки от реализации веточного корма из подлесочных пород – 4044 р./га.

Живой напочвенный покров под пологом березняка черничного представлен травянистыми растениями, кустарничками, полукустарниками и мхами. Всего в составе растительности травяно-кустарничкового яруса выявлено 29 видов [11], 19 из них имеют ресурсное значение. К пищевым растениям относится 11 видов (в т. ч. 5 ягодных), к лекарственным растениям – 18, к техническим (содержат дубильные вещества и красители) – 4, к медоносам – 17. Из общего количества полезных растений 16 видов – полиресурсные, т. е. один и тот же вид относится к 2, 3 и даже к 4 сырьевым группам.

При заготовке пищевых растений и лекарственного сырья необходимо соблюдать требования [9], где указано (ст. 19), что заготовка соцветий и надземных органов («травы») однолетних растений проводится на одной заросли 1 раз в 2 года, надземных органов многолетних растений – 1 раз в 4–6 лет, а подземных органов большинства видов лекарственных растений – не чаще 1 раза в 15–20 лет. Варьирование установленных сроков допускается только для однолетних растений.

Исходя из требований [9] и видового состава травяно-кустарничкового яруса в данном березняке можно заготавливать ресурсные виды в следующих объемах (кг/га за сезон) – табл. 4.

Таблица 4

Видовой состав и запасы ресурсных растений под пологом березняка черничного

| Вид | Пр, % | В, % | Запасы, кг/га | Стоимость, р./га | Сырьевая группа |
|--|-------|------|---------------|------------------|-----------------|
| Брусника <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L. | 7,6 | 34 | 59 | 6490 | 1, 2, 3 |
| Вероника лекарственная <i>Veronica officinalis</i> L. | 2,0 | 31 | 13 | 1430 | 2, 3 |
| Ветреница дубравная <i>Anemone nemorosa</i> L. | 5,2 | 22 | 33 | 3630 | 2, 3 |
| Герань лесная <i>Geranium sylvaticum</i> L. | 3,2 | 17 | 30 | 3300 | 2, 3 |
| Гравилат городской <i>Geum urbanum</i> L. | 4,1 | 14 | 41 | 4510 | 1, 2, 3, 4 |
| Дудник лесной <i>Angelica sylvestris</i> L. | 3,0 | 11 | 88 | 9680 | 1, 2, 3 |
| Зверобой пятнистый <i>Hypericum maculatum</i> Crantz. | 1,7 | 11 | 27 | 2970 | 2 |
| Земляника лесная <i>Fragaria vesca</i> L. | 1,0 | 14 | 11 | 1210 | 1, 2, 3 |
| Золотарник обыкновенный <i>Solidago virgaurea</i> L. | 3,0 | 20 | 52 | 5720 | 2, 3, 4 |

Окончание табл. 4

| Вид | Пр, % | В, % | Запасы, кг/га | Стоимость, р./га | Сырьевая группа |
|---|-------|------|---------------|------------------|-----------------|
| Иван-чай <i>Chamaenerion angustifolium</i> L. | 2,0 | 11 | 35 | 3850 | 1, 2, 3, 4 |
| Кислица <i>Oxalis acetosella</i> Kuntze | 7,4 | 42 | 14 | 1540 | 1, 2, 3 |
| Костяника каменная <i>Rubus saxatilis</i> L. | 17,2 | 67 | 109 | 11 990 | 1, 2, 3 |
| Ландыш майский <i>Convallaria majalis</i> L. | 1,0 | 8 | 28 | 3080 | 2 |
| Лапчатка прямостоячая <i>Potentilla erecta</i> (L.) Raeusch. | 1,0 | 6 | 17 | 1870 | 2, 3 |
| Малина обыкновенная <i>Rubus idaeus</i> L. | 4,3 | 6 | 94 | 10 340 | 1, 2, 3 |
| Марьяник дубравный <i>Melampyrum nemorosum</i> L. | 2,0 | 14 | 23 | 2530 | 3 |
| Медуница лекарственная <i>Pulmonaria obscura</i> Dumort. | 6,0 | 20 | 60 | 6600 | 1, 2, 3 |
| Сныть обыкновенная <i>Aegopodium podagraria</i> L. | 5,3 | 6 | 90 | 9900 | 1, 2, 3 |
| Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i> L. | 37,0 | 89 | 243 | 26 730 | 1, 2, 3, 4 |
| <i>Итого</i> | 112 | – | 1067 | 117 370 | – |

Примечание: Пр – проективное покрытие; В – встречаемость; сырьевая группа: 1 – пищевые, 2 – лекарственные, 3 – медоносные, 4 – технические.

Цены на пищевые, лекарственные и сырьевые растения варьируют в пределах от 80 до 130 р./кг. Для всех видов растений с целью сокращения однообразных вычислений использовали среднее значение – 110 р./кг.

Под пологом березняка черничного урожай представленных видов ягод средний. Обильнее плодоносят костяника и черника – соответственно 19 и 43 кг/га. Ягод брусники в данных условиях – около 6 кг/га, а земляники – немногим более 3 кг/га (табл. 5).

Таблица 5

Урожайность ягод под пологом березняка черничного, кг/га

| Вид | Стоимость, р./кг | Запасы, кг/га | Общая стоимость, р./га |
|---|------------------|---------------|------------------------|
| Брусника <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L. | 260 | 5,9 | 1534 |
| Земляника <i>Fragaria vesca</i> L. | 650 | 3,1 | 2015 |
| Костяника каменная <i>Rubus saxatilis</i> L. | 300 | 19,4 | 5820 |
| Черника <i>Vaccinium myrtillus</i> L. | 320 | 43,3 | 13 856 |
| <i>Итого</i> | – | 71,7 | 23 225 |

В целом с учетом запасов и урожайности основных видов ресурсов и сезона заготовки березняк черничный может приносить доход следующих объемов – табл. 6.

Таблица 6

Потенциальные ресурсы в березняке черничном, р./га

| Ресурс | Осенне-зимний период | | Весенне-летний период | |
|---|----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | с рубкой | без рубки | с рубкой | без рубки |
| Древесина | 200 840 | – | 200 840 | – |
| Березовый сок | – | – | 243 504 | 243 504 |
| Березовые почки | 97 370 | 9737 | – | – |
| Березовые листья | – | – | 441 958 | 44 196 |
| Березовые веники | – | – | 241 920 | 24 192 |
| Береста | 144 095* | – | 216 307** | 70 300*** |
| Веточный корм из березы, осины, ольхи, клена и вяза | – | – | 10 534 | 1053 |
| Веточный корм из подроста | – | – | 2160 | 2160 |
| Веточный корм из подлеска | – | – | 4044 | 4044 |
| Метлы из порубочных остатков | 94 080 | – | 94 080 | – |
| Метлы из подроста и подлеска | 20 615 | 20 615 | 20 615 | 20 615 |
| Колья 1,2 м × 5 см | 63 756 | – | 63 756 | – |
| Капы | 2040 | 2040 | 2040 | 2040 |
| Чага | 4250 | 4250 | 4250 | 4250 |
| Древесная зелень еловая | 14 424 | – | 14 424 | – |
| Лекарственные и пищевые растения | – | – | 117 370 | 117 370 |
| Ягоды | – | – | 23 225 | 23 225 |
| <i>Итого</i> | 641 470 | 36 642 | 1 484 720 | – |
| <i>Итого с заготовкой листьев</i> | – | – | 1 232 266 | 391 112 |
| <i>Итого с заготовкой веников</i> | – | – | 999 329 | 371 105 |
| <i>Итого с заготовкой веточного корма</i> | – | – | 767 943 | 347 966 |

* Ошкуровочная береста. ** Соковая береста. *** Береста с растущих деревьев до высоты 6 м.

Заключение

Таким образом, ресурсный потенциал лесного участка с березовым древостоем в зависимости от сезона года в рублевом эквиваленте при сплошной рубке древостоя может составить 641–1232 тыс. р./га, а без рубки – от 37 до 391 тыс./га в год. В среднем за год, с учетом возраста древостоя, березняк черничный за счет древесины способен приносить доход 2643 р./га, а за счет других видов ресурсов – от 437 до 877 тыс. р./га. Следовательно, основная часть ресурсов лесного участка – это недревесные ресурсы, или побочная продукция леса.

При зимней рубке доходы будут меньше, т. к. в этом случае получают только древесину, колья, бересту, березовые почки и метелки. При рубке в летний период доходы увеличиваются в основном за счет зеленой фитомассы, пищевых и лекарственных растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Албегов Р.Б. Оценка природно-ресурсного потенциала РСО-Алания // Природные ресурсы РСО-Алания. Владикавказ: Проект-Пресс, 2001. С. 16–26. Albegov R.B. Assessment of the Natural Resource Potential of the Republic of North Ossetia–Alania. *Natural Resources of the Republic of North Ossetia–Alania*. Vladikavkaz, Projekt-Press Publ., 2001, pp. 16–26.

2. Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России). СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с. Gryazkin A.V. *Renewable Potential of Taiga Forests (Case Study of Spruce Forests in Northwest Russia)*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2001. 188 p.

3. Грязькин А.В., Беляева Н.В., Данилов Д.А., Ванджурак Г.В., Хунг Ву Ван. Изменчивость толщины и массы коры березы по длине ствола // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 32–39. Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Danilov D.A., Vanzhurak G.V., Hung Vu Van. Thickness and Weight Variability of Birch Bark along the Trunk Length. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.32>

4. Грязькин А.В., Любимов А.В., Самсонова И.Д., Хетагуров Х.М., Хунг Ву Ван, Ванджурак Г.В. Сокопродуктивность березы в зависимости от количества подсочных каналов на стволе // Аграр. науч. журн. 2017. № 6. С. 7–10. Gryazkin A.V., Lyubimov A.V., Samsonova I.D., Khetagurov Kh.M., Hung Vu Van, Vandzhurak G.V. Productivity of Birch Juice According to the Number of Channels on the Trunk. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], 2017, no. 6, pp. 7–10.

5. Грязькин А.В., Самсонова И.Д., Новикова М.А., Лам Фан Тхань, Ванджурак Г.В., Хунг Ву Ван. Изменчивость биометрических показателей бересты в зависимости от характеристик древостоя // Изв. СПбЛТА. 2018. Вып. 222. С. 94–109. Gryazkin A.V., Samsonov I.D., Novikova M.A., Phan Thanh Lam, Vanjurak G.V., Hung Vu Van. The Variability of Biometric Indicators of Birch Bark, Depending on the Characteristics of the Forest. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2018, iss. 222, pp. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.94-109>

6. Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г. Обще-союзные нормативы для таксации лесов: справ. М.: Колос, 1992. 495 с. Zagreyev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkaleva A.G. *All-Union Standards for Forest Inventory: Handbook*. Moscow, Kolos Publ., 1992. 495 p.

7. Курлович Л.Е., Николаев Г.В., Черкасов А.Ф., Косицын В.Н. Руководство по учету и оценке второстепенных лесных ресурсов и продуктов побочного лесопользования.

Пушкино (Моск. обл.): ВНИИЛМ, 2003. 315 с. Kurlovich L.E., Nikolayev G.V., Cherkasov A.F., Kositsyn V.N. *Guide on Accounting and Valuation of Secondary Forest Resources and Products of Secondary Forest Use*. Pushkino, VNIILM Publ., 2003. 315 p.

8. Лебедев Ю.В., Лебедев М.Ю., Неклюдов И.А. Комплексная оценка лесов Урала и Западной Сибири // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2013. № 4. С. 172–176. Lebedev Y.V., Lebedev M.Y., Neklyudov I.A. Complex Estimation of Forests of the Urals and Western Siberia. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 4, pp. 172–176.

9. Приказ Рослесхоза от 05 дек. 2011 г. № 511 «Об утверждении Правил заготовки пищевых лесных ресурсов и сбора лекарственных растений»: доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс». *Order of the Federal forestry Agency of December 5, 2011 No. 511 "On the Approval of the Rules for Harvesting Forest Food Resources and Collecting Medicinal Plants"*.

10. Распоряжение Правительства РФ от 20 сент. 2018 г. № 1989-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс». *The Decree of the Government of the Russian Federation of September 20, 2018 No. 1989-r "On Approval of the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030"*.

11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2017620231. Сорные виды растений, преобладающие на лесных питомниках Ленинградской области: № 2016621727: заявл. 28.12.2016: опубли. 21.02.2017 / А.А. Кочкин, А.В. Грязькин, В.Б. Апарин. Kochkin A.A., Gryazkin A.V., Aparin V.B. *Weed Species Predominant in Forest Nurseries in the Leningrad Region*. Certificate of State Registration of the Database No. 2017620231, 2018.

12. Хунг Ву Ван, Хетагуров Х.М., Кочкин А.А., Новикова М.А., Тхао До Ван. Интенсивность выделения березового сока в зависимости от диаметра ствола и габитуса кроны // Аграр. науч. журн. 2016. № 10. С. 46–49. Hung Vu Van, Hetagurov Kh.M., Kochkin A.A., Novikova M.A., Thao Do Van. The Release Rate of Birch Juice Depending on the Trunk Diameter and Crown Shape. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], 2016, no. 10, pp. 46–49.

13. Черкасов А.Ф., Миронов К.А., Шутов В.В., Тяк Г.В., Веремьева С.С. Недревесные лесные ресурсы Костромской области: дикорастущие плоды и ягоды, лекарственные растения и грибы. Кострома: КГТУ, 2006. 250 с. Cherkasov A.F., Mironov K.A., Shutov V.V., Tyak G.V., Verem'yeva S.S. et al. *Non-Wood Forest Resources of the Kostroma Region: Wild Fruits and Berries, Medicinal Plants and Mushrooms*. Kostroma, KGTU Publ., 2006. 250 p.

14. Шматков Н.М. Недревесные ресурсы леса – здоровье человека и здоровье экономики лесных районов // Бюл. Центра экол. политики России «На пути к устойчивому развитию России». 2004. № 28. С. 17–19. Shmatkov N.M. Non-Wood Resources of the Forest – Human Health and Health of the Economy of Forest Areas. *Byulleten' Tsentra ekologicheskoy politiki Rossii "Na puti k ustoychivomu razvitiyu Rossii"*, 2004, no. 28, pp. 17–19.

15. Arnold J.E.M., Pérez M.R. Can Non-Timber Forest Products Match Tropical Forest Conservation and Development Objectives? *Ecological Economics*, 2001, vol. 39, iss. 3, pp. 437–447. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(01\)00236-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00236-1)

16. Boxall P.C., Murray G., Unterschultz J.R., Boxall P.C. Non-Timber Forest Products from the Canadian Boreal Forest: An Exploration of Aboriginal Opportunities. *Journal of Forest Economics*, 2003, vol. 9, iss. 2, pp. 75–96. DOI: <https://doi.org/10.1078/1104-6899-00027>

17. *Global Forest Resources Assessment. Main Report*. FAO Forestry Paper No. 140. Rome, FAO, 2001. Available at: <https://www.fao.org/3/y1997e/y1997e00.htm> (accessed 24.04.20).
18. Heinrich M. Book Review. Non-Timber Forest Products. Medicinal Herbs, Fungi, Edible Fruits and Nuts and Other Natural Products from the Forest. *Journal of Ethnopharmacology*, 2002, vol. 79, iss. 3, pp. 393–394. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(01\)00416-0](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(01)00416-0)
19. Kidane B., van der Maesen L.J.G., van Andel T., Asfaw Z. Ethnoveterinary Medicinal Plants Used by the Maale and Ari Ethnic Communities in Southern Ethiopia. *Journal of Ethnopharmacology*, 2014, vol. 153, iss. 1, pp. 274–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.02.031>
20. Larsen H.O., Olsen C.S., Boon T.E. The Non-Timber Forest Policy Process in Nepal: Actors, Objectives and Power. *Forest Policy and Economics*, 2000, vol. 1, iss. 3-4, pp. 267–281. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(00)00013-7)
21. Lung N.N. The Status of Forest Resources in Vietnam: Matter of Environment, Economy, Society and Resolutions. *Journal of Agriculture and Rural Development*, 2001, no. 12, pp. 891–893.
22. Mahapatra A.K., Tewari D.D. Importance of Non-Timber Forest Products in the Economic Valuation of Dry Deciduous Forests of India. *Forest Policy and Economics*, 2005, vol. 7, iss. 3, pp. 455–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2004.02.002>
23. Mahmood Ad., Mahmood Aq., Malik R.N., Shinwari Z.K. Indigenous Knowledge of Medicinal Plants from Gujranwala District, Pakistan. *Journal of Ethnopharmacology*, 2013, vol. 148, iss 2, pp. 714–723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.05.035>
24. Misra M.K., Dash S.S. Biomass and Energetics of Non-Timber Forest Resources in a Cluster of Tribal Villages on the Eastern Ghats of Orissa, India. *Biomass and Bioenergy*, 2000, vol. 18, iss. 3, pp. 229–247. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00086-0)
25. Nakazono E.M., Bruna E.M. Experimental Harvesting of the Non-Timber Forest Product *Ischnosiphon polyphyllus* in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 190, iss. 2-3, pp. 219–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.10.013>
26. *Non-Wood News 13*. Rome, FAO, 2006. 92 p.
27. Nygren A., Lacuna-Richman C., Keinänen K., Alsa L. Ecological, Socio-Cultural, Economic and Political Factors Influencing the Contribution of Non-Timber Forest Products to Local Livelihoods: Case Studies from Honduras and the Philippines. *Small-Scale Forest Economics, Management and Policy*, 2006, vol. 5, iss. 2, pp. 249–269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11842-006-0013-5>
28. Scott A.D., Burger J.A., Crane B. Expanding Site Productivity Research to Sustain Non-Timber Forest Functions. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 227, iss. 1-2, pp. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.017>
29. Vasilev Z., Markov I., Jambazova M. Methodology for Economic Evaluation and Commercialization of Environmental Services Provided to the Population in Protected Recreational Forests. (Bulgaria). *Science of Gorata*, 2003, vol. 40, no. 1, pp. 3–32.
30. Wong J.L.G., Thornber K., Baker N. Resource Assessment of Non-Wood Forest Products: Experience and Biometric Principles. *Non-Wood Forest Products 13*. Rome, FAO, 2001. 109 p.

УДК 630*232:58.087:543.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-36-48

ХАРАКТЕРИСТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ

М.А. Гусакова, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-5528-2019](https://orcid.org/0000-0002-2937-2604),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2937-2604>

К.Г. Боголицын, д-р хим. наук, гл. науч. сотр, проф.; ResearcherID: [AAA-6432-2019](https://orcid.org/0000-0002-4055-0483),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-0483>

А.А. Красикова, канд. хим. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAH-5816-2020](https://orcid.org/0000-0001-6040-2026),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-2026>

Н.В. Селиванова, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAA-5681-2019](https://orcid.org/0000-0002-3393-0664),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3393-0664>

С.С. Хвиюзов, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAH-9795-2020](https://orcid.org/0000-0002-4810-2378),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-2378>

Н.А. Самсонова, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-9486-2020](https://orcid.org/0000-0003-4422-7453),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4422-7453>

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: mariya_gusakova@mail.ru, k.bogolitsin@narfu.ru, snatalia-arh@yandex.ru, ann.krasikova@gmail.com, khviuzov.s@yandex.ru, gavrilova.iepn@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 19.04.20 / Принята к печати 05.08.20

Аннотация. В настоящее время выращивание сеянцев основных лесохозяйственных пород осуществляют в тепличных комплексах, производя посадочный материал с закрытой корневой системой. В связи с особенностями данного процесса возникает вопрос об устойчивости получаемого посадочного материала к условиям окружающей среды. На рост и развитие сеянцев при многоротационных схемах выращивания будут влиять как тепличные условия, так и условия площадки закалывания. В связи с этим оценка готовности посадочного материала к переносу в открытый грунт становится актуальной научной задачей. С химической точки зрения одними из наиболее подходящих индикаторов для такой оценки являются вторичные метаболиты – конечные продукты биосинтеза. Цель исследования – изучение химических маркеров формирования древесного вещества как критериев завершения годового цикла развития сеянцев (при летних сроках посева) и их готовности к вынесению в открытый грунт. Сосна обыкновенная – наиболее подходящий модельный объект для проведения исследований, поскольку она – типичный представитель хвойных лесов и имеет обширный ареал произрастания, а также высокий адаптационный потенциал. На ранних этапах развития сеянцы сосны, как правило, характеризуются повышенной чувствительностью к действию окружающей среды. Для анализа процессов биосинтеза основных компонентов древесной ткани применяли физико-химические методы. Исследована сезонная динамика фенольных соединений в отдельных частях однолетних сеянцев сосны обыкновенной. Выявлено: в момент выноса на площадку закалывания растения адаптируются к новому для них температурному режиму. Это выражается в снижении содержания низкомолекулярных фенольных соединений, препятствующих развитию неконтролируемых окислительных процессов, запускающихся под воздействием неблагоприятных и стрессовых условий среды. Обнаружено, что изменение уровня кониферилового спирта как предшественника макромолекулярных структур лигнина древесины является маркером лигнификации

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

при вегетации растений. В качестве критериев завершения годичного цикла формирования сеянца и его готовности к высаживанию в естественную среду могут выступать содержание фенольных соединений (не менее 120–140 мг/г $C_{орг}$) и активность пероксидазы в «хвое» (0,1–0,3 ед. активности).

Для цитирования: 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 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 36–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-36-48

Финансирование: Исследования проведены в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН ФНИ в 2018–2021 гг. (тема № АААА-А18-118012390231-9) с использованием оборудования ЦКП НО КТ РФ-Арктика (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН).

Ключевые слова: биосинтез, выращивание сеянцев, фенольные соединения, лигнификация, ферментативная активность.

CHARACTERISTICS OF WOOD SUBSTANCE FORMATION DURING GROWING OF SCOTS PINE SEEDLINGS USING CHEMICAL MARKERS

Maria A. Gusakova, Candidate of Engineering, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAB-5528-2019](https://orcid.org/0000-0002-2937-2604), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2937-2604>

Konstantin G. Bogolitsyn, Doctor of Chemistry, Chief Research Scientist, Prof.;

ResearcherID: [AAA-6432-2019](https://orcid.org/0000-0002-4055-0483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-0483>

Anna A. Krasikova, Candidate of Chemistry, Research Scientist; ResearcherID: [AAH-5816-2020](https://orcid.org/0000-0001-6040-2026),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-2026>

Natalia V. Selivanova, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAA-5681-2019](https://orcid.org/0000-0002-3393-0664), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3393-0664>

Sergey S. Khviyuzov, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAH-9795-2020](https://orcid.org/0000-0002-4810-2378), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-2378>

Nina A. Samsonova, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAB-9486-2020](https://orcid.org/0000-0003-4422-7453),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4422-7453>

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: mariya_gusakova@mail.ru, k.bogolitsyn@narfu.ru, snatalia-arh@yandex.ru, ann.krasikova@gmail.com, khviyuzov.s@yandex.ru, gavrilova.iepn@yandex.ru

Original article / Received on April 19, 2020 / Accepted on August 5, 2020

Abstract. Currently, seedlings of the main silvicultural species are grown in greenhouses by the technology of ball-rooted planting material production. The process features raise the issue of the resulting planting material sustainability in relation to environmental conditions. Seedling growth and development in multi-rotation growing schemes will be influenced by both greenhouse and hardening site conditions. This makes assessing the planting material readiness for transfer to the open ground an urgent scientific task. Secondary metabolites (end products of biosynthesis) are one of the most suitable indicators for such an assessment from a chemical point of view. This study aims to explore chemical markers of wood substance formation as a criterion for completion of the annual development cycle of seedlings (at summer sowing dates) and their readiness for planting in the open ground. Scots pine is a good model object for the research, since it is a typical representative of coniferous forests, has an extensive range of growth as well as a high adaptive potential. Pine seedlings are usually highly sensitive to environmental conditions in the early stages of development. Physicochemical

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

methods were used for the analysis of the biosynthesis processes of the main wood substance components. The seasonal dynamics of phenolic compounds content in different parts of annual Scots pine seedlings showed that the plants adapt to the temperature changes when they are brought to the hardening site. The adaptation includes a decrease in the content of low-molecular phenolic compounds preventing the development of uncontrolled oxidative processes when plant is exposed to adverse and stressful environmental conditions. It was found that the changes in the content of coniferyl alcohol as a precursor of lignin structures of coniferous wood can serve as a marker of lignification in the studied vegetation process. The content of phenolic compounds (at least 120–140 mg/g of TOC) and the peroxidase activity in needles (0.1–0.3 units of activity) may serve as criteria for the completion of the annual cycle of seedling formation and the degree of its readiness for planting in the natural environment.

For citation: Gusakova M.A., Bogolitsyn K.G., Krasikova A.A., Selivanova N.V., Khviyuzov S.S., Samsonova N.A. Characteristics of Wood Substance Formation during Growing of Scots Pine Seedlings Using Chemical Markers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 36–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-36-48

Funding: The research was carried out within the state assignment of the FECIAR UrB RAS as part of the Fundamental Research Program in 2018–2021 (project No. AAAA-A18-118012390231-9) using equipment of the Core Facility Centre “Critical Technologies of the Russian Federation in the Field of Environmental Safety in the Arctic” (CFC CT RF “Arktika”).

Keywords: biosynthesis, growing, phenolic compounds, lignification, enzymatic activity.

Введение

В настоящее время одними из важнейших проблем лесопромышленного комплекса являются истощенность лесного фонда в транспортно-доступных сырьевых районах и ухудшение его состояния. Поэтому на Европейском Севере России лесовосстановление – актуальная задача, которая может быть решена внедрением в лесокультурное производство лесообразующих пород, полученных из современных видов посадочного материала [2, 3, 6, 19].

Сеянцы сосны обыкновенной выращиваются как посадочный материал с закрытой корневой системой (ПМЗК). Производство ПМЗК широко распространено в последние десятилетия в скандинавских странах и ряде других государств Северной Европы, Южной Америки, а также в Канаде и США [14, 18, 22]. С опорой на опыт скандинавских коллег построены тепличные комплексы с технологией ПМЗК в Республике Карелии, Ленинградской и Архангельской областях [3, 5].

Сейчас во многих регионах России широко применяются двух- и трехротационные схемы выращивания контейнеризированных сеянцев сосны – посадки осуществляются как ранней весной, так и поздним летом. На рост и развитие сеянцев в этом случае будут влиять условия выращивания и – после вынесения сеянцев на площадку закаливания – климатические условия окружающей среды.

Выращиванию посадочного материала хвойных пород, его морфологии и физиологическим показателям посвящены многие публикации [1, 2, 9, 12, 13]. Одним из визуальных маркеров формирования сеянца, часто используемым для оценки готовности растения к выносу на площадку закаливания, обычно служит закладка верхушечной почки [8]. В то же время с химической точки зрения в число наиболее подходящих индикаторов состояния растительного организма

входят вторичные метаболиты – конечные продукты биосинтеза [10], к которым относится, например, лигнин, синтезируемый из фенольных соединений. Он является основной неуглеводной частью древесины, его наличие характерно для клеточных стенок высших растений. Данное вещество формирует в древесине надмолекулярную структуру древесного вещества, обеспечивает устойчивость к повреждениям, защищает от действия патогенных микроорганизмов [4].

Лигнин образуется в результате окислительных взаимодействий, при которых мономерные фенольные соединения окисляются до резонансно стабилизированных радикалов, реагирующих между собой. Полимеризация монолигнолов может быть связана с дегидрирующей способностью двух ферментативных комплексов – на основе пероксидазы или лакказы – причем ведущая роль в процессах лигнификации отводится пероксидазе [8, 17]. На ранних стадиях формирования древесного вещества предшественники лигнина представляют собой фенольные соединения небольшой молекулярной массы, и их содержание по сравнению с углеводной составляющей невелико. Мономерные предшественники лигнина в присутствии пероксидазы претерпевают так называемую дегидрогенизацию, т. е. потерю атома водорода фенольной группы, и превращаются в феноксильные радикалы [4].

Таким образом, целью исследования являлось изучение химических маркеров формирования древесного вещества как критериев завершения годового цикла развития сеянцев сосны обыкновенной (при летних сроках посева, 2-я ротация) и их готовности к вынесению в открытый грунт.

Объекты и методы исследования

Материалом для исследования служили образцы сеянцев сосны обыкновенной, выращенные по технологии ПМЗК (посев 2.07.2018 г.) в устьянском лесном селекционно-семеноводческом центре Архангельской области в кассетах «Плантек-81» с размером ячеек 4×4×7 см на торфяном субстрате промышленного производства марки «Агробалт-С» с внесением отечественных удобрений 1 раз в месяц. Субстрат представляет собой кислый ($pH_{H_2O} = 5,05$; $pH_{KCl} = 4,40$) верховой слаборазложившийся торф с содержанием микроэлементов и органического вещества не менее 80 %. Полив и подкормка сеянцев осуществлялись с помощью поливной установки. Качественные характеристики используемой для полива воды: $pH = 7,14$; ХПК = 10,8 мгО₂/л; окислительно-восстановительный потенциал = +295 мВ; минерализация в пересчете на NaCl = 175,7 мг/л; удельная электропроводность = 366,0 мкСм/см [5].

Определение содержания общих фенольных соединений в сеянцах сосны проводили колориметрическим методом с использованием реактива Фолина–Дениса [25]. Пробы экстрактов получали растиранием 0,25 г сырья в 25 мл этилового спирта. 1,0 мл экстракта помещали в пробирку вместимостью 10 мл, дистиллированной водой доводили объем до 7 мл, перемешивали содержимое пробирки и вносили 0,5 мл реактива Фолина–Дениса. Через 3 мин добавляли 1,0 мл насыщенного раствора Na₂CO₃ и доводили водой до 10 мл. Через 1 ч измеряли оптическую плотность при $\lambda = 730$ нм на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония).

Анализ родственных лигнину мономерных фенолов гваяцильного ряда в свежеприготовленных спиртовых экстрактах сеянцев выполняли с использованием системы высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ)

LC30AD Nexera X2 со спектрофотометрическим детектированием (Shimadzu, Япония). Для разделения фракции фенольных соединений на индивидуальные компоненты применяли обращенно-фазовую колонку NukleodurPolarTec, 150×3.0 мм, 3 мкм (Macherey-Nagel, Германия), элюент – смесь ацетонитрила и высокочистой воды I типа с добавкой муравьиной кислоты 0,5 %. Разделение проводили в изократическом режиме, скорость потока элюента составляла 0,4 мл/мин, содержание ацетонитрила – 20 %, температура термостата – 40 °С; объем вводимой пробы – 10 мкл. Детектирование осуществляли при длине волны 280 нм [7].

Концентрация общих фенольных соединений (мг/л) пересчитана на единицу массы органического углерода (мг/г $C_{орг}$), что позволило исключить влияние влажности. Определение содержания органического углерода проводили методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе общего органического углерода TOC-L CSN (Shimadzu, Япония) в образцах, предварительно высушенных лиофильно с использованием установки-модификатора Lyovaror L-200 (Buchi, Индия).

С целью анализа функциональной природы фенольных соединений в исследуемых экстрактах использованы методы производной и дифференциальной УФ-спектроскопии. Электронные спектры экстрактов записаны на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в диапазоне 220–500 нм с интервалом 0,5 нм. Получены УФ-спектры растворов с нейтральным рН, с рН 12 и в 0,2 М NaOH. По данным дифференциальных спектров, рассчитанных вычитанием спектра нейтрального раствора из спектра 0,2 М NaOH, найдены значения приведенной оптической плотности – отношения оптических плотностей в максимумах поглощения 300 и 360 нм к концентрации экстрактов.

Для оценки активности пероксидазы использовали методику [16]. Навеску растительного материала (100–200 мг) растирали в фарфоровой ступке с небольшим количеством фосфатного буфера и переносили в мерную колбу вместимостью 10 см³, доводя буфером до метки. Через 20 мин настаивания экстракт фильтровали через бумажный фильтр. Методика основана на определении скорости окисления 0,8 мМ гваякола (Sigma) 1,5 мМ пероксидом водорода при температуре 25 °С в среде 0,1 М калий-фосфатного буфера (рН = 7,0) при $\lambda = 416$ нм на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония).

Результаты исследования и их обсуждение

У семян сосны обыкновенной можно выделить следующие стадии (этапы) развития: прорастание семени; формирование проростка; хвоевая; стволовая, или корневая (переходная); заключительная. На стадии прорастания семени за счет впитывания влаги увеличивается его масса, разрывается семенная кожура и появляется корешок. Длительность этого этапа колеблется от 1 до 2 недель. На стадии формирования проростка наблюдается удлинение корешка и появление на поверхности почвы семенного колпачка. Затем происходит удлинение стебелька (гипокотил) и разворачивание пучка семядолей, которые освобождаются от семенной оболочки. Боковых корней, микоризы и настоящих хвоинок на данной стадии не появляется.

Хвоевая стадия характеризуется преобладанием в проросте органической массы фотосинтезирующего аппарата (хвои), необходимого для синтеза орга-

нических веществ, обуславливающего дальнейший прирост и накопление древесины в стволике. Продолжительность данной стадии около 1 месяца. Стволовая стадия – начало интенсивного, далеко не равномерного у разных древесных пород прироста стволика (эпикотилия) за счет фотосинтеза и интенсивного поглощения из почвы азота и зольных элементов. Длительность этапа составляет 1–1,5 месяца. На заключительной стадии развития формируются верхушечные почки, она завершается примерно за 1,5–2 месяца, с конца августа до конца октября. Несмотря на то, что в это время заканчивается процесс вегетации и растение переходит в состояние покоя, данный период характеризуется определенной физиологической активностью: происходит прирост стволика по диаметру, поглощаются элементы минерального питания, органы растения одревесневают вследствие продолжающейся лигнификации тканей.

По принятой технологии процесс выращивания ПМЗК в теплицах делится на три основных периода: начальный (проращивания), быстрого роста, закалывания. Последний начинается после выноса сеянцев из теплицы на площадку доращивания, когда идет процесс заложения верхушечной почки. При этом продолжается радиальный рост стволика и корней. Состояние сеянцев на площадке доращивания зависит от времени наступления, силы и продолжительности заморозков, а также от длительности светового дня.

Для более детального рассмотрения процессов биосинтеза нами было принято условное деление каждого сеянца на части: корень, стволик и хвоя (рис. 1). Изучение химических маркеров формирования древесного вещества проводили для стволика и хвои.



Рис. 1. Сеянец сосны обыкновенной на хвоевой / стволовой стадии: 1 – корень; 2 – стволик; 3 – хвоя

Fig. 1. A seedling of Scots pine at the needle / stem stage: 1 – root; 2 – stem; 3 – needles

У хвойных растений биологические процессы наиболее активно протекают в древесной зелени, где происходит синтез и накопление широкого ряда соединений (вторичных метаболитов), расходуемых в течение многолетних циклов на построение древесной массы. Наибольшее содержание фенольных соединений и, соответственно, более интенсивные процессы биосинтеза и накопления низкомолекулярных фенольных соединений также наблюдаются в хвоевой части – ассимиляционном органе растения. Динамика их изменения в сеянцах

сосны на протяжении годового цикла представлена на рис. 2. Согласно полученным данным, количество фенольных соединений в хвое сеянцев сосны в процессе их роста и развития увеличивается и к формированию первого годичного слоя достигает 120–140 мг/г $C_{орг}$.

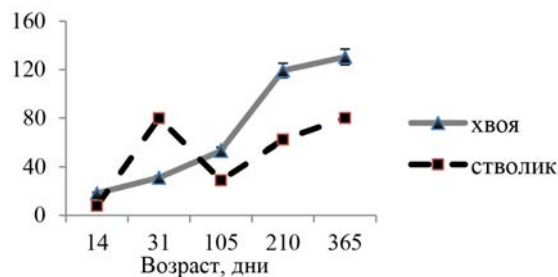


Рис. 2. Изменение общего содержания (мг/г $C_{орг}$) фенольных соединений в экстрактах сеянцев сосны на протяжении годового цикла

Fig. 2. Changes in the total content (mg/g TOC) of phenolic compounds in extracts of Scots pine seedlings throughout the annual cycle

В зимний период (105–210 дн.) содержание фенольных соединений в стволиках несколько снижается, предположительно, в связи с процессами конденсации. Согласно литературным данным [1, 24, 26], биосинтез лигнинного полимера протекает по свободно-радикальному механизму через стадии ферментативной дегидрогенизационной полимеризации *n*-гидроксикоричных спиртов и сопровождается присоединением отдельных феноксильных радикалов к растущему полимеру [4, 21, 23]. Так, на примере родственных лигнину мономерных фенолов установлено, что соединения с сопряженной с бензольным кольцом карбонильной группой (ванилин, ацетованилон, ванилиновая кислота) характеризуются большим окислительным потенциалом, т. е. менее выраженными окислительно-восстановительными свойствами по сравнению с несопряженными мономерными фенолами, к которым относятся *n*-гидроксикоричные спирты – основные мономерные предшественники лигнина [4].

С целью количественной оценки изменения относительного содержания несопряженных и сопряженных фенольных соединений были получены дифференциальные спектры спиртовых экстрактов сеянцев, максимум поглощения которых при 300 нм соответствует несопряженным, а при 360 нм – сопряженным фенольным единицам. Различия в содержании данных фенольных соединений на протяжении формирования сеянца (годовой цикл) представлены на рис. 3.

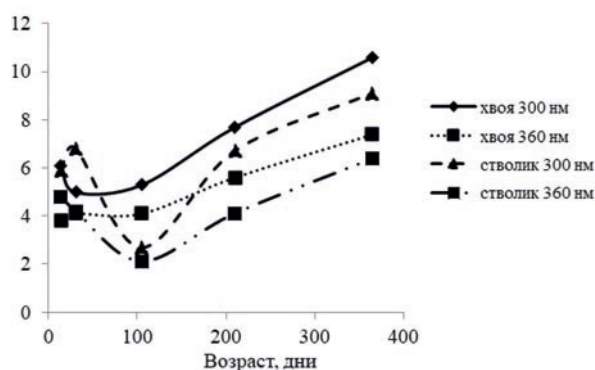


Рис. 3. Изменение интенсивности спектральных полос ($\Delta D/c, \cdot 10^3$) в дифференциальных спектрах экстрактов сеянцев сосны в течение первого года развития

Fig. 3. Changes in the intensity of spectral bands ($\Delta D/c, \cdot 10^3$) in the differential spectra of extracts of Scots pine seedlings during the first year of development

Показано, что в спиртовых экстрактах образцов хвои и стволиков присутствуют сопряженные и, в относительно большем количестве, несопряженные фенольные структуры. Например, с 14-го по 105-й день развития в хвое наиболее выражены изменения несопряженных фенольных структур, количество которых на 31-й день уменьшается на 15 % (отн.), а к 105-му дню падает на 6 %. По мере развития стволиков содержание несопряженных фенольных структур увеличивается на 19 % (14–31-й день), а к 105-му дню – снижается в 2,5 раза. Данные изменения, вероятно, вызваны переходом преимущественно несопряженных фенольных структур в более высокомолекулярные формы.

Уменьшение содержания сопряженных фенольных структур с увеличением возраста стволиков обусловлено, скорее всего, участием первых в формировании экстрактивных веществ. В экстрактах хвои уровень сопряженных фенолов меняется незначительно.

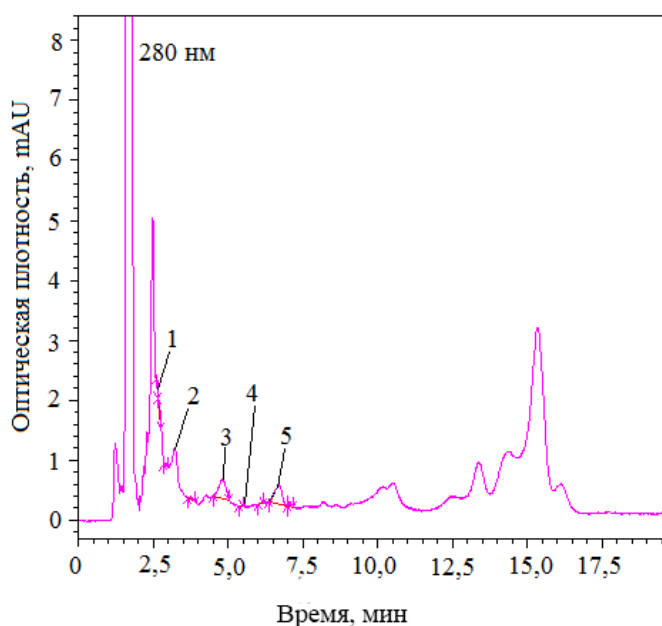
Со 105-го по 210-й день развития растений (осенне-зимний период), значительно растет содержание сопряженных и несопряженных фенолов, что сопоставимо с увеличением общего количества фенольных соединений, определенных по методу Фолина–Дениса в экстрактах сеянцев возрастом 210 дней.

С 210-го по 365-й день повышается $\Delta D/c$ несопряженных и сопряженных форм, это подтверждается изменением общего уровня фенольных соединений. В образцах стволовой части доля несопряженных фенольных соединений значительно выше по сравнению с хвоей, что и обуславливает увеличение содержания ароматической компоненты в стволовой части растений.

Полученные методами УФ-спектроскопии данные свидетельствуют о сложном многокомпонентном составе фенольных соединений. Для исследования их природы у развивающихся сеянцев использован метод ВЭЖХ. Хроматограммы экстрактов хвои и стволиков схожи. В качестве примера на рис. 4 представлена типичная хроматограмма экстракта хвои сеянцев возрастом 105 дней.

Рис. 4. Хроматограмма экстракта сеянцев (хвоя, 105 дней): 1 – ванилиновый спирт; 2 – ванилиновая кислота; 3 – кониферилловый спирт; 4 – ванилин; 5 – ацетованилон

Fig. 4. Chromatogram of the studied extract of seedlings (needles, 105 days): 1 – vanillin alcohol; 2 – vanillic acid; 3 – coniferyl alcohol; 4 – vanillin; 5 – acetovanillone



В процессе лигнификации хвойных растений в качестве мономеров участвуют *n*-гидроксикоричные спирты, *n*-гидроксикоричные кислоты, а также производные этих спиртов и кислот [20]. В литературе *n*-гидроксикоричные спирты рассматриваются как основные участники процесса лигнификации [15]. В связи с этим в ходе исследования определяли соединения, относящиеся к группе родственных лигнину фенолов гваяцильного ряда: кониферилловый спирт, ванилиновый спирт, ванилин, ванилиновую кислоту, ацетованилон, гваякол. На рис. 5 представлено изменение содержания мономерных предшественников лигнина в стволике на ранних этапах развития сеянцев.

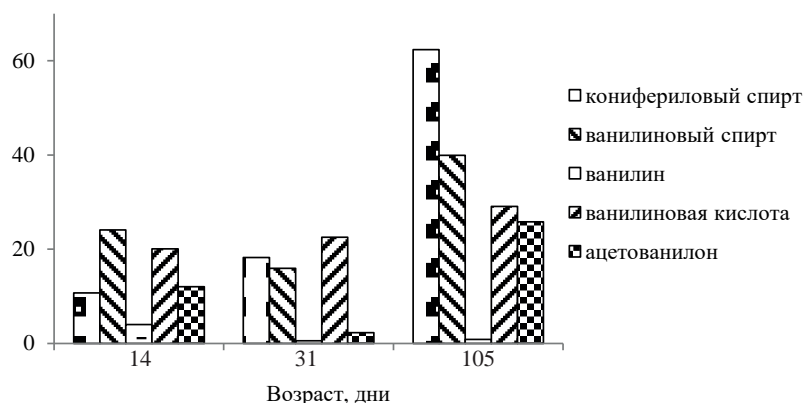


Рис. 5. Изменение содержания (мкг/г $C_{орг}$) мономерных предшественников лигнина в стволике на ранних этапах развития сеянцев сосны

Fig. 5. Changes in the content ($\mu\text{g/g } C_{org}$) of monomeric lignin precursors in stem at the early stages of development of Scots pine seedlings

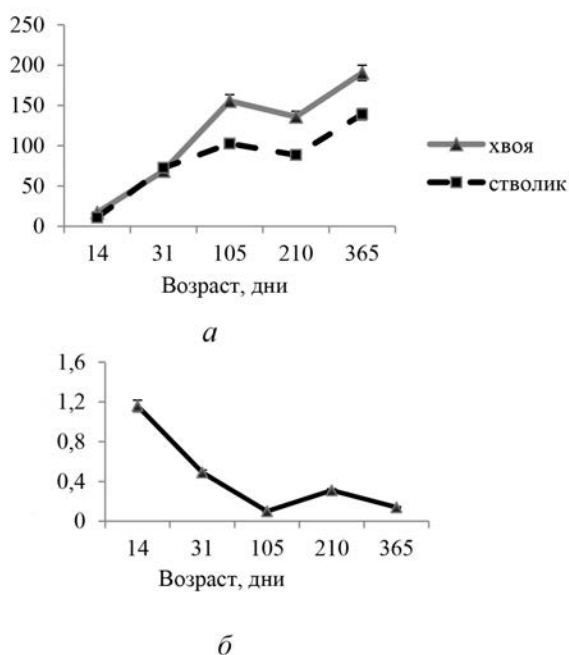
В исследуемых мономерных фенольных соединениях в экстрактах сеянцев преобладают кониферилловый и ванилиновый спирты. Наибольшее содержание кониферилового спирта характерно для хвои, что свидетельствует о более интенсивных процессах биосинтеза вторичных фенольных метаболитов в ней. В связи с этим при анализе компонентного состава фенольных соединений важно учитывать повышение содержания *n*-гидроксикоричных спиртов до концентраций 100 мкг/г $C_{орг}$, главным образом кониферилового спирта как предшественника макромолекулярных структур лигнина (рис. 6, а). Другие определяемые фенолы могут образовываться в ходе биохимических процессов, выступая промежуточными соединениями при окислении ванилинового спирта, не участвуя в лигнификации непосредственно, а формируя экстрактивные вещества.

Изменение содержания кониферилового спирта при формировании сеянца характерно как для хвои, так и для стволика: и в хвое, и в стволике в возрасте 210 дней наблюдается его небольшое снижение на 17 % (отн.), что обуславливается расходом кониферилового спирта на протекающие в растении в зимний период процессы лигнификации.

Как было отмечено, лигнификация в высших растениях происходит при участии ферментного комплекса на основе пероксидазы или лакказы, причем преимущественная роль принадлежит пероксидазе. Ее минимальная активность наблюдается в хвое сосны на 105-й день (рис. 6, б).

Рис. 6. Изменение на протяжении годового цикла: *a* – содержания (мкг/г $C_{орг}$) кониферилового спирта в экстрактах семян сосны; *б* – активности пероксидазы (ед. активности) в хвое семян сосны

Fig. 6. Changes throughout the annual cycle: *a* – coniferyl alcohol content ($\mu\text{g/g TOC}$) in extracts of Scots pine seedlings; *б* – peroxidase activity (units of activity) in needles of Scots pine seedlings



Это может быть вызвано повышенной функциональной лабильностью данного фермента и его способностью реагировать на большинство нарушений гомеостаза, к которым относится и перенос семян из теплицы на площадку закаливания. При закаливании происходят процессы конденсации и полимеризации фенольных структурных единиц.

В зимний период (210 дней) у сосны незначительно повышается пероксидазная активность, что является результатом стрессового воздействия низких температур. Совокупность известных сведений [11] о последовательных сезонных изменениях данного вида активности хвои в осенне-зимний период указывает на возможность протекания в ней при низких температурах активных адаптационных процессов, включая биосинтез отдельных компонентов. Эти процессы приводят к накоплению пероксидных группировок, вследствие чего повышается активность пероксидазы, катализирующей реакцию разложения перекиси водорода. Наблюдаемая адаптивная перестройка окислительного аппарата в сторону активации пероксидазы препятствует нарушению дыхательного процесса, что позволяет растениям поддерживать уровень окислительно-восстановительных процессов на относительно стабильном уровне. На заключительной стадии развития происходит резкое снижение ферментативной активности (0,1–0,3 ед.) в связи с усилением процессов лигнификации.

Заключение

В ходе исследований показано, что в момент выноса семян на площадку закаливания происходит их адаптация к существующему температурному режиму, выраженная в снижении содержания низкомолекулярных фенольных соединений, препятствующих развитию неконтролируемых окислительных процессов под влиянием неблагоприятных и стрессовых условий среды. Из-за низких температур в зимний период растение оказывается под воздействием

окислительного стресса, в условиях которого запускаются процессы ферментативной активности пероксидазы.

Таким образом, изучение особенностей биохимических процессов формирования древесной матрицы при выращивании посадочного материала с закрытой корневой системой выявило, что в качестве маркеров готовности сеянца к высаживанию и его устойчивости к естественным условиям среды могут выступать содержание фенольных соединений (не менее 120–140 мг/г $C_{орг}$) и активность пероксидазы в хвое (0,1–0,3 ед. активности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Яханова Е.А., Горелова З.В., Соколова А.А., Кентбаев Е.Ж., Кентбаева Б.А., Шабалина М.В. Развитие ксилемы и лигнификация е клеток у сеянцев сосны с открытой и закрытой корневой системой // Вестн. НГСХА. 2014. Т. 4. С. 25–35. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Yakhanova E.A., Gorelova Z.V., Sokolova A.A., Kentbayev E.Zh., Kentbayeva B.A., Shabalina M.V. Xylem Development and Lignification of Its Cells in Bare-Rooted and Ball-Rooted Pine Seedlings. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2014, vol. 4, pp. 25–35.
2. Бессчетнова Н.Н., Кулькова А.В. Содержание запасных питательных веществ в клетках тканей годичных побегов представителей рода ель (*Picea* L.) в условиях Нижегородской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 52–61. Besschetnova N.N., Kul'kova A.V. The Content of Reserve Nutrients in the Cells of Annual Shoot Tissues of the Representatives of the Spruce (*Picea* L.) Genus in Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.52>
3. Бобушкина С.В. Интенсивность роста и развития сеянцев сосны с закрытой корневой системой при разных режимах выращивания для лесовосстановления в Архангельской области: дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2014. 196 с. Bobushkina S.V. *Intensity of Growth and Development of Ball-Rooted Pine Seedlings under Different Regimes of Cultivation for Reforestation in the Arkhangelsk Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Arkhangel'sk, 2014. 196 p.
4. Боголицын К.Г., Лунин В.В., Косяков Д.С. и др. Физическая химия лигнина: моногр. М.: Академкнига, 2010. 492 с. Bogolitsyn K.G., Lunin V.V., Kosyakov D.S. et al. *Physical Chemistry of Lignin*: Monograph. Moscow, Akademkniga Publ., 2010. 492 p.
5. Жигунов А.В., Маркова И.А. Производство посадочного материала в лесных питомниках Северо-Запада России: практические рекомендации. СПб.: СПбНИИЛХ, 2005. 114 с. Zhigunov A.V., Markova I.A. *Production of Planting Material in Forest Nurseries of the North-West of Russia: Practical Recommendations*. Saint Petersburg, SPbNIIILH Publ., 2005. 114 p.
6. Маркова И.А. Современные проблемы лесовыращивания (Лесокультурное производство). СПб.: СПбГЛТА, 2008. 156 с. Markova I.A. *Current Issues of Forest Cultivation (Forestry Production)*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2008. 156 p.
7. Красикова А.А., Боголицын К.Г., Гусакова М.А., Ивахнов А.Д., Хвиузов С.С., Самсонова Н.А. Анализ фенольных компонентов в сверхкритических экстрактах древесины *Juniperus communis* L. методом ВЭЖХ // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2018. Т. 13, № 4. С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.34984/SCFTP.2018.13.4.006>. Krasikova A.A., Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Ivakhnov A.D., Khviuzov S.S., Samsonova N.A. Analysis of Phenolic Components in the Supercritical Extracts of the *Juniperus communis* L. Wood by the Method of HPLC. *Sverkhkriticheskiye flyuidy: Teoriya i praktika* [Supercritical Fluids: Theory and Practice], 2018, vol. 13, no. 4, pp. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990793119070169>

8. Тарханов С.Н., Бирюков С.Ю. Морфоструктура и изменчивость биохимических признаков популяции сосны (*Pinus sylvestris* L.) в стрессовых условиях устья Северной Двины // Сиб. экол. журн. 2014. № 2. С. 319–327. Tarkhanov S.N., Biryukov S.Yu. Morphostructure and Biochemical Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Stressing Environment of North Dvina Estuary Region. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2014, no. 2, pp. 319–327.

9. Федотов А.Н., Жигунов А.В. Влияние длины дня на формирование верхушечных почек у однолетних контейнеризированных сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 215. С. 80–91. Fedotov A.N., Zhigunov A.V. The Effect of the Day Length on the Formation of Apical Buds in One-Year-Old Containerized Seedlings of Scots Pine and Norway Spruce. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2016, iss. 215, pp. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.80-91>

10. Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты / отв. ред. Н.В. Загоскина, Е.Б. Бурлакова. М.: Науч. мир, 2010. 400 с. *Phenolic Compounds: Fundamental and Applied Aspects*. Ed. by N.V. Zagoskina, E.B. Burlakova. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2010. 400 p.

11. Шавнин С.А., Юсупов И.А., Марина Н.В., Монтиле А.А., Голиков Д.Ю. Сезонные изменения содержания хлорофиллов и каротиноидов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне влияния теплового поля газового факела // Физиология растений. 2021. Т. 68, № 3. С. 315–325. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0015330321020184>. Shavnin S.A., Yusupov I.A., Marina N.V., Montile A.A., Golikov D.Yu. Seasonal Changes in Chlorophyll and Carotenoid Content in Needles of Scots Pines (*Pinus sylvestris* L.) Exposed to the Thermal Field of a Gas Flare. *Fiziologiya rastenij* [Russian Journal of Plant Physiology], 2021, vol. 68, no. 3, pp. 315–325. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1021443721020187>

12. Якимов Н.И., Крук Н.К., Юреня А.В. Биометрические показатели и густота однолетних сеянцев сосны и ели в закрытом грунте при разных нормах высевы семян // Проблемы лесоведения и лесоводства. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2016. Вып. 76. С. 302–306. Yakimov N.I., Kruk N.K., Yurenya A.V. Biometric Indices and Density of Annual Seedlings of Pine and Spruce in Closed Ground at Different Rates of Seed Sowing. *Issues of Forest Science and Forestry*. Gomel, Institut lesa NAN Belarusi Publ., 2016, iss. 76, pp. 302–306.

13. Якимов Н.И., Крук Н.К., Юреня А.В. Агротехника выращивания сеянцев сосны обыкновенной в условиях закрытого грунта // Тр. БГТУ. 2018. Сер. 1: Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. № 1. С. 25–30. Yakimov N.I., Kruk N.K., Yurenya A.V. Agricultural Cultivation of Seedlings of Scots Pine in a Greenhouse. *Trudy BGTU. Ser. 1: Lesnoye khozyaystvo, prirodopol'zovaniye i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry. Environmental management. Reprocessing of renewable resources], 2018, no. 1, pp. 25–30.

14. Barnett J.P. Activities that Increase Germination and Establishment of Longleaf Pine Seedlings in Containers. *Proceedings: Workshops on Growing Longleaf Pine in Containers–1999 and 2001*. General Technical Report. SRS-56. Asheville, NC, USDA, 2002, pp. 18–21.

15. Barros J., Serk H., Granlund I., Pesquet E. The Cell Biology of Lignification in Higher Plants. *Annals of Botany*, 2015, vol. 2015, iss. 7, pp. 1053–1074. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcv046>

16. Bergmeyer H.U. *Methods of Enzymatic Analysis*. Vol. 1. New York, Academic Press, 1974. 495 p.

17. Harkin J.M., Obst T.R. Lignification in Trees: Indication of Exclusive Peroxidase Participation. *Science*, 1973, vol. 180, iss. 4083, pp. 296–298. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.180.4083.296>

18. Juntunen M.-L., Rikala R. Fertilization Practice in Finnish Forest Nurseries from the Standpoint of Environmental Impact. *New Forests*, 2001, vol. 21, pp. 141–158. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011837800185>
19. Nilsson U., Louranen J., Kolström T., Örlander G., Puttonen P. Reforestation with Planting in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 4, pp. 283–294. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.498384>
20. Ralph J. Hydroxycinnamates in Lignification. *Phytochemistry Reviews*, 2010, vol. 9, iss. 1, pp. 65–83. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-009-9141-9>
21. Shigeto J., Honjo H., Fujita K., Tsutsumi Y. Generation of Lignin Polymer Models via Dehydrogenative Polymerization of Coniferyl Alcohol and Syringyl Alcohol via Several Plant Peroxidases Involved in Lignification and Analysis of the Resulting DHPs by MALDI-TOF Analysis. *Holzforschung*, 2018, vol. 72, iss. 4, pp. 267–274. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0125>
22. Taylor E.L., Blazier M., Gordon Holley A. New Pine Planting Strategies for the Western Gulf States. *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations – 2006*. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-50. Fort Collins, CO, USDA, 2007, pp. 104–109.
23. Vanholme R., Demedts B., Morreel K., Ralph J., Boerjan W. Lignin Biosynthesis and Structure. *Plant Physiology*, 2010, vol. 153, iss. 3, pp. 895–905. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.110.155119>
24. Vogt T. Phenylpropanoid Biosynthesis. *Molecular Plant*, 2010, vol. 3, iss. 1, pp. 2–20. DOI: <https://doi.org/10.1093/mp/ssp106>
25. Waterman P.G., Mole S. *Analysis of Phenolic Plant Metabolites*. London, Blackwell Scientific Publications, 1994. 238 p.
26. Weng J.-K., Chapple C. The Origin and Evolution of Lignin Biosynthesis. *New Phytologist*, 2010, vol. 187, iss. 2, pp. 273–285. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03327.x>

УДК 635.925

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-49-61

ЗИМОСТОЙКОСТЬ ХВОЙНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПИ ЮГА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Л.В. Лящева¹, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABB-2644-2021](https://orcid.org/0000-0002-9266-8707),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9266-8707>

А.А. Лящев¹, д-р биол. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3761-7587>

Ю.С. Штейнберг², директор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2466-180X>

¹Государственный аграрный университет Северного Зауралья, ул. Республики, д. 7, г. Тюмень, Россия, 625003; e-mail: liashheva53_72@ Rambler.ru, laa_2003@ Rambler.ru

²Ландшафтная мастерская Yucca Park, 14-й км Салаирского тракта, г. Тюмень, Россия, 625009; e-mail: yuccapark@bk.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 20.03.20 / Принята к печати 01.08.20

Аннотация. Исследовано 4 вида рода пихта, 3 вида рода ель (в их числе (здесь и далее) ели обыкновенной – 14 сортов, ели колючей – 12), 2 вида рода лиственница (лиственницы западноевропейской – 3), 7 видов рода сосна (сосны горной – 7, туи западной – 12), 6 видов рода можжевельник (можжевельника обыкновенного – 3, можжевельника казацкого – 5, можжевельника скального – 1, можжевельника чешуйчатого – 3, можжевельника виргинского – 2, можжевельника среднего – 3) и 1 вид микробиоты перекрестнопарной. Изученные растения были разделены на 3 группы: высокоперспективные, малоперспективные и неперспективные для данного региона. Большинство представителей 1-й группы имеют обширные ареалы, что свидетельствует о широком диапазоне их экологического потенциала. Выявлено, что для использования 2-й группы растений надо тщательно подбирать подходящие им места и уделять большое внимание мероприятиям по уходу. Растения из 3-й группы активно применять в озеленении нецелесообразно. По результатам анализа был также разработан ключ подбора хвойных растений для озеленения северной лесостепи юга Тюменской области на основе их размерных характеристик, видовой и сортовой принадлежности и расцветки хвои. Выделено, кроме того, 4 группы по признаку высоты: стелющиеся, низкорослые, среднерослые и высокорослые. Каждая группа подразделяется на 3 подгруппы по окраске хвои: зеленая, желтоватая и голубовато-сизая. При создании декоративных насаждений необходимо учитывать размер растения. Так, быстрорастущие сорта целесообразно высаживать для получения в короткие сроки декоративного эффекта или в местах, где необходимо достаточно быстро обеспечить ветро- или шумозащиту. Среднерослые виды подойдут для озеленения любых территорий, а с применением ограничительных стрижек даже для малых садов или для топиарного искусства; низкорослые растения – для озеленения малых садов, альпинариев, небольших композиций. Почвопокровные в зависимости от темпа роста могут использоваться как замена газона, для закрепления склонов, для создания коврового эффекта.

Для цитирования: Лящева Л.В., Лящев А.А., Штейнберг Ю.С. Зимостойкость хвойных растений в условиях северной лесостепи юга Тюменской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 49–61. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-49-61

Ключевые слова: растения-интродуценты, декоративные хвойные растения, зимостойкость, малоперспективные для юга Тюменской области, высокоперспективные для юга Тюменской области, неперспективные для юга Тюменской области, обрезка, притенение, полив.

WINTER HARDINESS OF CONIFERS IN THE NORTHERN FOREST STEPPE CONDITIONS OF THE SOUTH OF THE TYUMEN REGION

*Lyudmila V. Lyasheva*¹, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABB-2644-2021](https://orcid.org/0000-0002-9266-8707), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9266-8707>

*Aleksandr A. Lyashev*¹, Doctor of Biology, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3761-7587>

*Yuliya S. Steinberg*², Director; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2466-180X>

¹Northern Trans-Ural State Agricultural University, ul. Respubliki, 7, Tyumen, 625003, Russian Federation; e-mail: liashheva53_72@rambler.ru, laa_2003@rambler.ru

²Landscape Workshop “Yucca Park”, 14 km Salairskogo trakta, Tyumen, 625009, Russian Federation; e-mail: yuccapark@bk.ru

Original article / Received on March 20, 2020 / Accepted on August 1, 2020

Abstract. We have studied 4 species of the genus fir, 3 species of the genus spruce (including (hereinafter) 14 varieties of Norway spruce and 12 varieties of blue spruce), 2 species of the genus larch (3 varieties of Western European larch), 7 species of the genus pine (7 varieties of mountain pine and 12 varieties of northern white cedar), 6 species of the genus juniper (3 varieties of common juniper, 5 varieties of savin juniper, a variety of Rocky Mountain juniper, 3 varieties of flaky juniper, 2 varieties of Virginian juniper and 3 varieties of *Juniperus pfitzeriana*) and a species of Siberian carpet cypress. All the studied plants were divided into three groups: highly promising, less promising and unpromising for this region. Most plants from the first group have large habitats indicating a wide range of their ecological potential. It has been found that the use of plants from the second group requires a careful selection of suitable locations and great attention to care measures. Plants from the third group are unpromising. It is impractical to use them actively in landscaping. The analysis also resulted in the development of a method for selecting coniferous plants for landscaping in the northern forest steppe of the south of the Tyumen region, based on their size parameters, species, varieties and needle colour. There are also 4 groups based on height: procumbent, scrubby, medium-grown, and tall-grown. Each group is divided into 3 subgroups based on the color of the needles: green, yellowish and caesious. The size of the plant has to be taken into account when creating ornamental plantations. Thus, fast-growing varieties are useful for short-term decorative effects or in places where wind or noise protection is required fairly quickly. Medium-grown species are suitable for landscaping any territories and, with the use of restrictive pruning, even for small gardens or topiary art. Scrubby plants are suitable for landscaping small gardens, rockeries, small compositions. Depending on their growth rate, groundcover plants can be used as a lawn replacement, to stabilize slopes and create a carpet effect.

For citation: Lyasheva L.V., Lyashev A.A., Steinberg Yu.S. Winter Hardiness of Conifers in the Northern Forest Steppe Conditions of the South of the Tyumen Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 49–61. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-49-61

Keywords: introduced plants, ornamental coniferous plants, winter hardiness, less promising for the south of the Tyumen region, highly promising for the south of the Tyumen region, unpromising for the south of the Tyumen region, pruning, shading, watering.

Введение

К самой разнообразной и многочисленной группе полезных растений для города относятся хвойные декоративные растения, которые выполняют не только средообразующие и ландшафтные функции, но и социальные, почво-

и шумозащитные, санитарно-гигиенические, эстетические и многие другие. Это относится к озеленению не только улиц и парков, но и частных территорий. Главная задача современной интродукции, предполагающей введение в культуру ценных в том или ином отношении растений за пределами их природных ареалов, – это обогащение растительных ресурсов данного региона за счет ресурсов мировой флоры [2, 8, 16].

Большую часть года в районах юга Тюменской области господствует зима. Поэтому особенно важно подбирать для озеленения такие растения, которые будут сохранять декоративность круглый год. Кроме того, декоративные формы хвойных пород являются важным дополнительным компонентом, использование которого значительно повышает художественный эффект садово-парковых композиций и зачастую уменьшает потребность в уходе за ними [1, 13]. Хвойные породы играют значительную роль в построении парковых пейзажей. Декоративный облик хвойных деревьев зависит в большей мере от способа расположения ветвей, густоты ветвления и облиствения [19, 25].

В данное время огромное количество сортов хвойных растений пришло на смену старому видовому разнообразию [6, 20, 21, 23, 26]. В настоящий момент они исчисляются тысячами, и, хотя в торговом обороте их реально гораздо меньше, ассортимент достаточен для любого коллекционера и садовода [18, 19, 22, 24]. Интродукция породы из пределов ареала естественного произрастания иногда осуществляется очень быстро, непосредственно в культуру, что позволяет внедрять новые породы в больших объемах при минимальных затратах труда и денежных средств. Однако при этом часты неудачи [5, 10, 11]. Именно поэтому важно проводить исследования зимостойкости и пригодности растений для выращивания в конкретных районах России [9, 15].

Цель исследования – подбор хвойных растений наиболее перспективных для озеленения городов и поселков юга Тюменской области. Задачи: отбор хвойных растений для проверки их устойчивости в данном регионе; оценка их зимостойкости на протяжении 2013–2015 гг.; объединение отнесенных по итогам наблюдений к перспективным растений в группы на основе размерных характеристик и окраски хвои в целях облегчения процесса подбора видов и сортов для композиций.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в частном коллекционном питомнике площадью 1 га, расположенном на 14-м км Салаирского тракта г. Тюмени. Объектом служили хвойные породы в возрасте от 4 до 10 лет. Все растения были закуплены в питомниках г. Тюмени и высажены с учетом морфологических особенностей и агротехнических рекомендаций [17]. Взято по 5 образцов каждого растения. Рельеф местности ровный. Почвы представлены черноземом выщелоченным: водный pH – 6,8...7,0, объемная масса почвы в слое 0...100 см – 1,25...1,35 г/см³, запасы гумуса – 579 т/га. Грунтовые воды находятся на уровне 5 м.

В исследованиях принимали участие такие растения, как *Abies sibirica*; *A. balsamea* 'Nana'; *A. koreana* 'Silberzwerg', 'Piccolo'; *A. concolor* 'Compacta'; *Picea obovata*; *P. abies* 'Virgata', 'Inversa', 'Columnaris', 'Pygmaea', 'Ohlendorffii', 'Maxwellii', 'Barryi', 'Echiniformis', 'Nidiformis', 'Little Gem', 'Wills Zwerg', 'Acrocona', 'Repens', 'Formanek'; *P. pungens* 'Glauca', 'Koster', 'Oldenburg', 'Erih Frahm',

'Fat Albert', 'Edith', 'Glauca globosa', 'Montgomery', 'Iseli Fastigiata', 'Lucky Strike', 'Bialobok', 'Hoopsii'; *Lárix sibírica*; *L. decidua* 'Pendula', 'Repens', 'Kornik'; *Pinus sylvéstris* 'Watereri', 'Fastigiata'; *P. sibírica*, *P. cembra*; *P. nigra* 'Nana'; *P. strobus* 'Radiata'; *P. pumila*; *P. mugo* 'Mops', 'Mini Mops', 'Gnom', 'Mughus', 'Pumilio', 'Carstens', 'Orange Sun', *Thuja occidentális* 'Sunkist', 'Rheingold', 'Woodwardii', 'Globosa', 'Golden Globe', 'Hoseri', 'Mr. Bowling Ball', 'Brabant', 'Aureospicata', 'Yellow Ribbon', 'Danica', 'Smaragd'; *Juniperus communis* 'Green Carpet', 'Spotty Spreader', 'Gold Cone'; *J. sabina* 'Blue Danube', 'Broadmoor', 'Variegata', 'Tamariscifolia', 'Mas'; *J. scopulorum* 'Blue Arrow'; *J. squamata* 'Meyeri', 'Blue Carpet', 'Blue Star'; *J. virginiana* 'Grey Owl', 'Hetz'; *J. pfitzeriana* 'Mint Julep', 'Gold Star', 'Old Gold'; *Microbióta decussáta*.

Исследования осуществляли по «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур» [12], методическим рекомендациям Крековой Я.А., Данчевой А.В., Залесова С.В. [8], Захаренко Г.С. [3], Савушкиной И.Г., Сеит-Аблаевой С.С. [15], Проценко Т.В., Герасимовой Е.Ю. [14] и др. с дополнениями и изменениями применительно к хвойным растениям.

Тюменская область расположена в зоне Зауралья в бассейне нижнего течения рек Оби и Иртыша на Западно-Сибирской низменности. Климат – резко континентальный, характеризуется холодной продолжительной зимой и коротким умеренно жарким летом. Беспрепятственное проникновение холодного арктического воздуха с севера и из сухого Казахстана обуславливает резкие колебания погоды и приводит к общей ее неустойчивости [4].

Годовое количество осадков – 450 мм, из них 224 мм выпадает за вегетационный период. Сумма эффективных температур выше +5 °С колеблется в пределах 1900–2050 °С, продолжительность периода температур выше 0 °С составляет 205–210 дней. Устойчивый снежный покров устанавливается 11 ноября, а разрушается 10 апреля, максимальная его высота формируется в марте – 36 см, с запасами воды в снеге 93 мм. Глубина промерзания почвы в среднем равна 108 см, но в отдельных районах достигает 250 см.

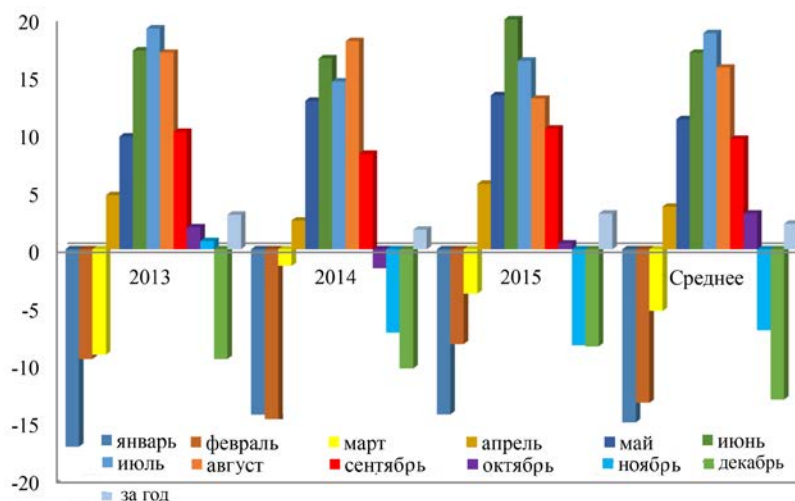
Средняя июльская температура воздуха – 18,8 °С при максимуме 36 и 38 °С, январская – –16,2 °С при минимуме – 41 °С. Последний весенний заморозок приходится, по средним многолетним данным, на 21 мая, но возможен до 12 июня, а первый осенний – на 19 августа и до 22 сентября соответственно. Количество дней с устойчивыми морозами составляет до 130 дней. Продолжительность безморозного периода – 114 дней. Гидротермический коэффициент (1,1) свидетельствует об удовлетворительной влагообеспеченности растений. Характерна крайне резкая смена погоды [4].

Тюмень – 3-я USDA-зона морозостойкости, северная лесостепь с абсолютным минимумом температуры от –40,0 до –34,5 °С [7]. Однако в условиях Тюмени комфортно себя чувствуют некоторые растения 4-й зоны (зоны морозостойкости по Герду Крюссманну), которые зимуют при температуре не ниже –34,4 °С, например сорта туи западной.

Расположение метеорологической станции в Тюмени (Тюменская область, Россия): 57°12' с. ш., 65°43' в. д., высота над уровнем моря – 102 м.

За 2013–2015 гг. исследований температура воздуха в январе была на 0,6...2,1 °С холоднее, а в 2015 г. теплее на 0,7 °С по сравнению со среднемноголетними данными. Июльские показатели превышали среднемноголетние

только в 2013 г. на $0,4^{\circ}\text{C}$. В 2014 и 2015 гг. они были ниже на $4,2$ и $2,4^{\circ}\text{C}$ соответственно. Резкие скачки температуры по сравнению со среднемноголетними данными наблюдались в феврале 2013 и 2015 гг., когда были зафиксированы отличия на $3,8$ и $5,1^{\circ}\text{C}$. Самый холодный март отмечен в 2013 г. ($-9,1^{\circ}\text{C}$), самый теплый – в 2014 ($-1,4^{\circ}\text{C}$). В остальные годы существенных скачков погоды не наблюдалось (см. рисунок).



Температурные показатели с января по декабрь 2013–2015 гг.
(Среднее – среднее многолетнее значение)

Temperatures from January to December 2013–2015
(Среднее – multi-year average)

Для оценки зимостойкости выбрана шкала, разработанная Ассоциацией производителей посадочного материала, основанная на позициях, важных с точки зрения использования растений в озеленительных целях [7].

Результаты исследования и их обсуждение

Морозостойкость и зимостойкость растений – понятия разные, хотя и близкие по значению. Зимостойкость – это, прежде всего, комплексная устойчивость ко всем неблагоприятным факторам в зимний, осенне-зимний и весенний периоды, таким как резкие перепады температур, долгие оттепели, избыток солнца, зимнее иссушение, возвратные заморозки, выпревание, вымокание и т. д. То есть это очень важная характеристика любого сорта, которая в описании, однако, часто не указывается.

Зимостойкость является одним из основных биологических признаков, определяющих возможность интродукции растений в районы северной лесостепи, в которой и находится юг Тюменской области. В целом для климата данной территории характерна частая смена воздушных масс. Вторжение арктического холодного воздуха в летние месяцы обычно вызывает заморозки в период вегетации, причем ни в один летний месяц нельзя гарантировать их отсутствие, т. к. Тюменская область относится к зоне рискованного земледелия.

Принятая для характеристики изучаемых хвойных растений шкала зимостойкости имела следующие баллы (градации): 1 – повреждений нет (растение не обмерзает); 2 – изредка обмерзает небольшая часть кроны; 3 – часто обмерзает 20–50 % кроны; 4 – обмерзает крона выше снежного покрова или > 50 % кроны; 5 – растение вымерзает полностью (табл. 1).

Учитывали данные о перезимовке растений на ровном месте в открытом грунте, для которых в годы наблюдений не применяли никакой защиты кроме естественного снежного покрова.

Таблица 1

**Зимостойкость хвойных растений
в условиях северной лесостепи юга Тюменской области, 2013–2015 гг.**

| Культура | Подмерзание кроны, % | | | | Зимостойкость, баллы | | | |
|--------------------------------------|----------------------|------|------|---------|----------------------|------|------|---------|
| | 2013 | 2014 | 2015 | среднее | 2013 | 2014 | 2015 | среднее |
| <i>Abies sibirica</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>A. balsamea</i> 'Nana' | 21 | 20 | 15 | 18,7 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| <i>A. koreana</i> 'Silberzwerg' | 24 | 22 | 18 | 21,3 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| <i>A. koreana</i> 'Piccolo' | 26 | 23 | 22 | 23,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>A. concolor</i> 'Compacta' | 24 | 22 | 18 | 21,3 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| <i>Picea obovata</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Virgata' | 26 | 24 | 20 | 23,3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>P. abies</i> 'Inversa' | 24 | 21 | 20 | 21,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>P. abies</i> 'Columnaris' | 36 | 49 | 32 | 39,0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>P. abies</i> 'Pygmaea' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Ohlendorffii' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Maxwellii' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Barryi' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Echiniformis' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Nidiformis' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Little Gem' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Wills Zwerg' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Acrocona' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Repens' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. abies</i> 'Formanek' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Glauca' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Koster' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Oldenburg' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Erih Frahm' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Fat Albert' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Edith' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Glauca globosa' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Montgomery' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Iseli Fastigiata' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Lucky Strike' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Bialobok' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. pungens</i> 'Hoopsii' | 26 | 25 | 20 | 23,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>Larix sibirica</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>L. decidua</i> 'Pendula' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>L. decidua</i> 'Repens' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>L. decidua</i> 'Kornik' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Окончание табл. 1

| Культура | Подмерзание кроны, % | | | | Зимостойкость, баллы | | | |
|---|----------------------|------|------|--------------|----------------------|------|------|--------------|
| | 2013 | 2014 | 2015 | сред- нее | 2013 | 2014 | 2015 | сред- нее |
| <i>Pinus sylvestris</i> 'Watereri' | 53 | 50 | 58 | 53,7 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>P. sylvestris</i> 'Fastigiata' | 61 | 54 | 51 | 55,3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>P. sibirica</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. cembra</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. nigra</i> 'Nana' | 17 | 25 | 14 | 18,7 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| <i>P. strobus</i> 'Radiata' | 28 | 22 | 21 | 23,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>P. pumila</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. mugo</i> 'Mops' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. mugo</i> 'Mini Mops' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. mugo</i> 'Gnom' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. mugo</i> 'Mughus' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. mugo</i> 'Pumilio' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>P. mugo</i> 'Carstens' | 29 | 24 | 20 | 24,3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>P. mugo</i> 'Orange Sun' | 30 | 26 | 19 | 25,0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>Thuja occidentalis</i> 'Sunkist' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Rheingold' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Woodwardii' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Globosa' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Golden Globe' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Hoseri' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Mr. Bowling Ball' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Brabant' | 46 | 42 | 32 | 40,0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Aureospicata' | 36 | 33 | 28 | 32,3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Yellow Ribbon' | 29 | 26 | 28 | 27,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Danica' | 9 | 11 | 12 | 10,7 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| <i>T. occidentalis</i> 'Smaragd' | 58 | 84 | 62 | 68,0 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>Juniperus communis</i> 'Green Carpet' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. communis</i> 'Spotty Spreader' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. communis</i> 'Gold Cone' | 50 | 53 | 56 | 53,0 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>J. sabina</i> 'Blue Danube' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. sabina</i> 'Broadmoor' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. sabina</i> 'Variegata' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. sabina</i> 'Tamariscifolia' | 27 | 24 | 22 | 24,3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>J. sabina</i> 'Mas' | 29 | 28 | 26 | 27,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>J. scopulorum</i> 'Blue Arrow' | 29 | 24 | 23 | 25,3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>J. squamata</i> 'Meyeri' | 67 | 63 | 65 | 65,0 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>J. squamata</i> 'Blue Carpet' | 26 | 22 | 20 | 22,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>J. squamata</i> 'Blue Star' | 24 | 22 | 26 | 24,0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>J. virginiana</i> 'Grey Owl' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. virginiana</i> 'Hetz' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. pfitzeriana</i> 'Mint Julep' | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>J. pfitzeriana</i> 'Gold Star' | 26 | 20 | 24 | 23,3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>J. pfitzeriana</i> 'Old Gold' | 24 | 21 | 20 | 21,7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>Microbiota decussata</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Исходя из полученных данных, мы распределили изученные растения по группам перспективности.

1. Высокоперспективные растения (1–2 балла) – самая многочисленная группа. Ареалы распространения большинства растений этой группы являются обширными, что свидетельствует о широком диапазоне их экологического потенциала. Благодаря хорошей побегообразовательной способности они, даже при незначительных повреждениях, быстро восстанавливаются, что позволяет сохранять естественную форму. Кроме того, в засушливые месяцы у представителей данной группы не наблюдалось признаков повреждения засухой. Хвойные этой группы можно классифицировать как декоративные и высокодекоративные. Из изученных видов и сортов сюда относятся: *Abies sibirica*; *Picea obovata*; *P. abies* 'Pygmaea', 'Ohlendorffii', 'Maxwellii', 'Barryi', 'Echiniformis', 'Nidiformis', 'Little Gem', 'Wills Zwerg', 'Acrocona', 'Repens', 'Formanek'; *P. pungens* 'Glauca', 'Koster', 'Oldenburg', 'Erih Frahm', 'Fat Albert', 'Edith', 'Glauca globosa', 'Montgomery', 'Iseli Fastigiata', 'Lucky Strike', 'Bialobok'; *Larix sibirica*; *L. decidua* 'Pendula', 'Repens', 'Kornik'; *Pinus sibirica*; *P. cembra*; *P. pumila*, *P. mugo* 'Mops', 'Mini Mops', 'Gnom', 'Mughus', 'Pumilio', *Thuja occidentalis* 'Sunkist', 'Rheingold', 'Woodwardii', 'Globosa', 'Golden Globe', 'Hoseri', 'Mr. Bowling Ball'; *P. nigra* 'Nana'; *Juniperus communis* 'Green Carpet', 'Spotty Spreader', 'Blue Danube', 'Broadmoor', 'Variegata', 'Danica'; *J. pfitzeriana* 'Mint Julep'; *J. virginiana* 'Grey Owl', 'Hetz'; *Microbiota decussata*.

2. Малоперспективные растения (3 балла). Во время перезимовки у представителей данной группы иногда повреждаются не только однолетние, но и многолетние ветви. Эти растения, особенно кипарисовики, ели колючие, туи и некоторые можжевельники, подвержены солнечным ожогам, а весной в Тюменской области интенсивность солнечной инсоляции очень высокая. С возрастом такие растения ослабевают, вследствие чего снижается их зимостойкость и декоративность. Для использования растений данной группы надо тщательно подбирать подходящие для них места, осуществлять активный уход (обрезка, притенение, подкормки, дополнительный полив, обработка от болезней и вредителей).

К малоперспективным хвойным растениям отнесены: *Abies balsamea* 'Nana'; *A. koreana* 'Silberzwerg', 'Piccolo'; *A. concolor* 'Compacta'; *Picea abies* 'Virgata', 'Inversa', 'Columnaris'; *P. pungens* 'Hoopsii'; *Pinus strobus* 'Radiata'; *P. mugo* 'Carstens', 'Orange Sun'; *Thuja occidentalis* 'Brabant', 'Aureospicata', 'Yellow Ribbon'; *Juniperus sabina* 'Tamariscifolia', 'Mas'; *J. scopulorum* 'Blue Arrow'; *J. pfitzeriana* 'Gold Star', 'Old Gold'; *J. squamata* 'Blue Carpet', 'Blue Star'.

3. Неперспективные растения (4–5 баллов). Растения, которые не перезимовали в какой-либо год исследований либо перезимовали, но полностью потеряли свои декоративные качества. Это *Pinus sylvestris* 'Watereri', 'Fastigiata'; *Juniperus communis* 'Gold Cone'; *J. squamata* 'Meyeri'; *Thuja occidentalis* 'Smaragd'.

Таким образом, зимостойкость оказалась достаточно высокой у большинства исследуемых растений. У некоторых недостаточно зимостойких видов хорошо показали себя карликовые или стланиковые формы.

Кроме этого, мы разработали ключ подбора хвойных растений для озеленения районов Северного Зауралья (табл. 2) на основе размерных характеристик и расцветки хвои, придающей хвойным особую привлекательность. Различаясь формой, размером и окраской, она позволяет создать многочисленные контрасты в ландшафтных композициях.

Таблица 2

Ключ подбора хвойных растений для зеленого строительства

| Форма кроны | Окраска листы | Растения | |
|---|---------------------------|---|---|
| Стелющаяся | Зеленая | Ель обыкновенная ' <i>Repens</i> ', ' <i>Formanek</i> ' | |
| | | Можжевельник обыкновенный ' <i>Green Carpet</i> ', ' <i>Spotty Spreader</i> ' | |
| | | Можжевельник казацкий ' <i>Tamariscifolia</i> ', ' <i>Broadmoor</i> ', ' <i>Mas</i> ' | |
| | | Можжевельник средний ' <i>Mint Julep</i> ' | |
| | | Микробиота перекрестнопарная | |
| | Желтая | Можжевельник казацкий ' <i>Variegata</i> ' | |
| | | Можжевельник горизонтальный ' <i>Golden Carpet</i> ', | |
| | Голубая | Можжевельник казацкий ' <i>Blue Danube</i> ' | |
| | | Можжевельник виргинский ' <i>Grey Owl</i> ', ' <i>Hetz</i> ' | |
| | | Можжевельник чешуйчатый ' <i>Blue Carpet</i> ' | |
| Низкорослая | Зеленая | Ель обыкновенная ' <i>Pygmaea</i> ', ' <i>Maxwellii</i> ', ' <i>Barryi</i> ', ' <i>Echiniformis</i> ', ' <i>Nidiformis</i> ', ' <i>Little Gem</i> ' | |
| | | Лиственница европейская ' <i>Kornik</i> ' | |
| | | Сосна горная ' <i>Mops</i> ', ' <i>Gnom</i> ', ' <i>Mughus</i> ', ' <i>Pumilio</i> ' | |
| | | Туя западная ' <i>Woodwardii</i> ', ' <i>Globosa</i> ', ' <i>Danica</i> ', ' <i>Hoseri</i> ', ' <i>Mr. Bowling Ball</i> ' | |
| | | Пихта бальзамическая ' <i>Nana</i> ' | |
| | | Пихта корейская ' <i>Silberzwerg</i> ', ' <i>Piccolo</i> ' | |
| | Желтая | Туя западная ' <i>Rheingold</i> ', ' <i>Golden Globe</i> ' | |
| | Голубая | Ель колючая ' <i>Glauca globosa</i> ' | |
| | | Кедровый стланик | |
| | | Можжевельник чешуйчатый ' <i>Blue Star</i> ' | |
| | | Пихта одноцветная ' <i>Compacta</i> ' | |
| | | Сосна веймутова ' <i>Radiata</i> ' | |
| | Среднерослая | Зеленая | Ель обыкновенная ' <i>Ohlendorffii</i> ', ' <i>Wills Zwerg</i> ', ' <i>Acrocona</i> ', ' <i>Virgata</i> ', ' <i>Inversa</i> ' |
| | | | Ель колючая ' <i>Lucky Strike</i> ' |
| Лиственница европейская ' <i>Repens</i> ' ф. плакучая | | | |
| Туя западная ' <i>Brabant</i> ' | | | |
| Желтая | | Ель колючая ' <i>Bialobok</i> ' | |
| | | Туя западная ' <i>Sunkist</i> ', ' <i>Yellow Ribbon</i> ', ' <i>Aureospicata</i> ' | |
| Голубая | | Ель колючая ' <i>Erih Frahm</i> ', ' <i>Fat Albert</i> ', ' <i>Edith</i> ', ' <i>Iseli Fastigiata</i> ' | |
| | | Можжевельник скальный ' <i>Blue Arrow</i> ' | |
| Высокорослая | Зеленая | Пихта сибирская | |
| | | Ель обыкновенная, ель сибирская, ель колючая | |
| | | Лиственница сибирская, лиственница западноевропейская | |
| | | Сосна обыкновенная, сосна сибирская | |
| | Можжевельник обыкновенный | | |
| | Голубая | Ель колючая ' <i>Glauca</i> ', ' <i>Hoopsii</i> ', ' <i>Koster</i> ', ' <i>Oldenburg</i> ' | |
| | | Сосна кедровая европейская | |

При создании декоративных насаждений необходимо учитывать размер растений, поэтому рассматриваемые хвойные были распределены на группы по признаку высоты: стелющиеся, низкорослые, среднерослые и высокорослые. Внутри каждой из них 3 подгруппы по окраске хвои: зеленая, желтоватая и голубовато-сизая. На практике это работает так. Быстрорастущие сорта целесообразно высаживать для создания декоративного эффекта в сжатые сроки или в местах, где необходимо достаточно быстро обеспечить ветро- или шумозащиту во все сезоны года, а также на больших территориях как растения-долгожители с круглогодичным декоративным эффектом или для топиарного искусства. Среднерослые виды растений подойдут для озеленения практически любых территорий, а с применением ограничительных стрижек – даже для малых садов. Низкорослые растения применимы для высадки в малых садах, альпинариях, небольших композициях. Почвопокровные – в зависимости от темпов роста – могут использоваться как газон, закреплять склон, создавать ковровый эффект и т. д.

Для посадок лучше приобретать названные растения небольших размеров. Плюсом разработанного подхода является более легкая адаптация и акклиматизация интродуцента к условиям нового места произрастания. Кроме того, растения с юного возраста можно формировать определенным образом (изгороди, топиарные либо стелющиеся формы и т. д.).

Заключение

В результате оценки зимостойкости исследуемые виды были разделены на три группы: высокоперспективные, малоперспективные и неперспективные. Зимостойкость оказалась достаточно высокой у большинства исследуемых растений. У некоторых недостаточно зимостойких растений хорошо показали себя карликовые или стланиковые формы.

В группу высокоперспективных растений вошли: *Abies sibirica*; *Picea obovata*; *P. abies* 'Pygmaea', 'Ohlendorffii', 'Maxwellii', 'Barryi', 'Echiniformis', 'Nidiformis', 'Little Gem', 'Wills Zwerg', 'Acrocona', 'Repens', 'Formanek'; *P. pungens* 'Glauca', 'Koster', 'Oldenburg', 'Erih Frahm', 'Fat Albert', 'Edith', 'Glauca globosa', 'Montgomery', 'Iseli Fastigiata', 'Lucky Strike', 'Bialobok'; *Larix sibirica*; *L. decidua* 'Pendula', 'Repens', 'Kornik'; *Pinus sibirica*; *P. Cembra*; *P. pumila*, *P. mugo* 'Mops', 'Mini Mops', 'Gnom', 'Mughus', 'Pumilio', *Thuja occidentalis* 'Sunkist', 'Rheingold', 'Woodwardii', 'Globosa', 'Golden Globe', 'Hoseri', 'Mr. Bowling Ball'; *Juniperus communis* 'Green Carpet', 'Spotty Spreader'; 'Blue Danube', 'Broadmoor', 'Variegata'; *J. pfitzeriana* 'Mint Julep'; *J. virginiana* 'Grey Owl', 'Hetz'; *Microbiota decussata*.

Большинство растений 1-й группы имеют обширные ареалы, т. е. широкий диапазон экологического потенциала. Благодаря хорошей побегообразовательной способности при незначительных повреждениях данные растения быстро восстанавливаются, что позволяет им сохранять их естественную форму. Кроме того, представители этой группы устойчивы к засухе, являются декоративными и высокодекоративными.

Для использования 2-й группы растений – малоперспективных – необходимо тщательно подбирать место посадки, осуществлять активный уход.

Растения из 3-й группы – неперспективные – широко применять в озеленении районов Северного Зауралья нецелесообразно. Даже перезимовавшие экземпляры иногда полностью теряют свои декоративные качества. В данное время проводятся работы по изучению приемов улучшения декоративных качеств растений, входящих в эту группу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова М.С. Миниатюрные хвойные // Флора. 1997. № 2. С. 13–15. Aleksandrova M.S. Miniature Conifers. *Flora*, 1997, no. 2, pp. 13–15.
2. Александрова М.С., Александров П.В. Хвойные растения в вашем саду. Ростов н/Д.: Феникс, 2005. 151 с. Aleksandrova M.S., Aleksandrova P.V. *Coniferous Plants in Your Garden*. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2005. 151 p.
3. Захаренко Г.С. Биологические основы интродукции и культуры видов рода кипарис (*Cupressus* L.). Киев: Аграр. наука, 2006. 256 с. Zakharenko G.S. *Biological Basis of Introduction and Cultivation of Species of the Genus Cypress (Cupressus L.)*. Kiev, Agrarnaya nauka Publ., 2006. 256 p.
4. Иваненко А.С., Кулясова О.А. Агроклиматические условия Тюменской области. Тюмень: ТГСХА, 2008. 206 с. Ivanenko A.S., Kulyasova O.A. *Agroclimatic Conditions of the Tyumen Region*. Tyumen, TvGSHA Publ., 2008. 206 p.
5. Калиниченко А.А. Оценка адаптации и целесообразности интродукции древесных растений // Бюл. Глав. ботанич. сада. 1978. Вып. 108. С. 3–8. Kalinichenko A.A. Assessment of Adaptation and Feasibility of Woody Plant Introduction. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada*, 1978, iss. 108, pp. 3–8.
6. Карпун Ю.Н. Основы интродукции растений // Hortus Botanicus. 2004. Т. 2. С. 17–32. Karpun Yu.N. The Main Problems of Introduction. *Hortus Botanicus*, 2004, vol. 2, pp. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.15393/j4.art.2003.1682>
7. Костылев Д.А. Обобщение данных по зимостойкости декоративных сортов древесных растений // Сб. докл. VI ежегод. конф. Ассоциации Производителей Посадочного Материала «Российские питомники: перспективы роста». М.: АППИМ, 2013. С. 18–22. Kostylev D.A. Generalization of Data on Winter Hardiness of Ornamental Varieties of Woody Plants. *Collection of Reports of the VI Annual Conference of the Association of Manufacturers of Planting Material "Russian Nurseries: Growth Prospects"*. Moscow, APPM Publ., 2013, pp. 18–22.
8. Крекова Я.А., Данчева А.В., Залесов С.В. Оценка декоративных признаков у видов рода *Picea* Dieter в Северном Казахстане // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1 (часть 1). С. 1657. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17204> (дата обращения: 17.12.21). Krekova J.A., Dancheva A.V., Zalesov S.V. Decorative Signs Estimation of Some Kinds of *Picea* Dieter Species in North Kazakhstan. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 1, part 1, p. 1657.
9. Лапин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М.: ГБС АН СССР, 1973. С. 7–67. Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessment of Woody Plant Introduction Prospects according to Visual Observations. *Experience of Woody Plant Introduction*. Moscow, GBS AN SSSR Publ., 1973, pp. 7–67.

10. Любимов В.Б. Интродукция растений: (теория и практика). Брянск: БГУ, 2009. 364 с. Lyubimov V.B. *Introduction of Plants: Theory and Practice*. Bryansk, BSU Publ., 2009. 364 p.

11. Любимов В.Б. Экологический метод интродукции деревьев и кустарников, дифференцированно природным условиям района исследований // Живые и биокосные системы. 2013. № 3. Режим доступа: <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-6> (дата обращения: 24.11.21). Lyubimov V.B. Ecological Methods Introduction of Trees and Shrubs, are Differentiated by Natural Conditions District. *Zhivyye i biokosnyye sistemy*, 2013, no. 3.

12. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1968. Вып. 6 (декоративные культуры). 222 с. *Methodology of State Variety Testing of Agricultural Crops*. Moscow, Kolos Publ., 1968, iss. 6 (Ornamental Crops). 222 p.

13. Марковский Ю.Б. Лучшие хвойные растения в дизайне сада. М.: Фитон+, 2014. 144 с. Markovskiy Yu.B. *The Best Coniferous Plants in Garden Design*. Moscow, Fiton+ Publ., 2014. 144 p.

14. Проценко Т.В., Герасимова Е.Ю. Оценка зимостойкости и морозоустойчивости древесных и кустарниковых растений в условиях Южного Урала на примере г. Оренбурга // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2014. № 39. С. 124–127. Protsenko T.V., Gerasimova E.Y. Evaluation of Winter Hardiness and Frost Resistance of Trees and Shrubs in the Southern Urals in the Example, Orenburg. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2014, no. 39, pp. 124–127.

15. Савушкина И.Г., Сеит-Аблаева С.С. Методика оценки декоративности представителей рода *Juniperus* L. // Экосистемы. 2015. Вып. 1. С. 97–105. Savushkina I.G., Seit-Ablaeva S.S. Technique of Assessment of the Decorative Genus *Juniperus* L. Representatives. *Ekosistemy*, 2015, iss. 1, pp. 97–105.

16. Сахарова С.Г., Хайрова Л.Н., Иванова Н.В. Перспективы массового введения в культуру малораспространенных древесно-кустарниковых растений в Санкт-Петербурге и Ленинградской области // Изв. СПбГАУ. 2010. № 21. С. 52–53. Sakharova S.G., Khayrova L.N., Ivanova N.V. Prospects of Mass Introduction of Sparsely Distributed Woody and Shrubby Plants in Saint Petersburg and the Leningrad Region. *Izvestiya SPbGAU* [Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University], 2010, no. 21, pp. 52–53.

17. Фирсов Г.А., Орлова Л.В. Хвойные в Санкт-Петербурге. СПб.: Росток, 2008. 336 с. Firsov G.A., Orlova L.V. *Conifers in Saint Petersburg*. Saint Petersburg, Rostok Publ., 2008. 336 p.

18. Хайрова Л.Н., Золотарева Е.В., Дубовицкая О.Ю. Деревья и кустарники для озеленения объектов ландшафтной архитектуры. СПб.: Проспект Науки, 2015. 224 с. Khayrova L.N., Zolotareva E.V., Dubovitskaya O.Yu. *Trees and Shrubs for Gardening Objects of Landscape Architecture*. Saint Petersburg, Prospect Nauki Publ., 2015. 224 p.

19. Blythe G. Cutting Propagation of *Juniperus procumbens* “Nana”. *Proceedings of the International Plant Propagators' Society*, S. 1, 1995, vol. 44, pp. 409–413.

20. Bo N. *Nordens flora*. Stockholm, Norstedts, 1997. 527 s.

21. Cufar K., Robic D., Torelli N., Kermavnar A. Die phanologie von unterschiedlich geschadigten Weisstannen (*Abies alba* Mill.) in Slowenien. *Schweiz. z. Forstw.*, 1996, B. 147, Nr. 2, S. 99–108.

22. Detila C. Der Einfluss des stadtklimas auf die phunologischen Eintrittstermine. *Schwein. z. Forstw.*, 1999, B. 150, Nr. 4, S. 151–153.
23. Dietrich P. 100 Jahre Douglasien im Stadtwald Cochem. *AFZ Wald*, 1997, B. 52, Nr. 11, S. 596–598.
24. Ebert H.P. Mabnahmen zur Seigerung der Umwelttoleranz von Waldbestanden. *AFZ Wald*, 1996, B. 51, Nr. 18, S. 1016–1018.
25. Houšková K., Mauer O. Vliv Výchozí Hustoty Sazenic Na Morfologickou Kvalitu Nadzemní Části Borovice Lesní (*Pinus sylvestris* L.) 8 Let Po Výsadbě [Initial Density of Transplants and Its Effect on the Morphological Quality of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Above-Ground Part Eight Years after Planting]. *Zpravy Lesnickeho Výzkumu* [Reports of Forestry Research], 2014, vol. 59, iss. 2, pp. 117–125.
26. Lewis J. *International Conifer Register*. Part 4. Juniperus. Ed. by A.S. Leslie. London, Royal Horticultural Society, 1998. 134 p.

УДК 630*161.34+630*164.4+581.134

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-62-76

САХАРОЗА В ТКАНЯХ ОДНОЛЕТНИХ ПОБЕГОВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ-ИНТРОДУЦЕНТОВ

М.М. Андропова¹, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4480-2020](https://orcid.org/0000-0002-9654-8913),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9654-8913>

А.В. Платонов², канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [E-9310-2019](https://orcid.org/0000-0002-1110-7116),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1110-7116>

¹Вологодский институт права и экономики ФСИН России, ул. Щетинина, д. 2, г. Вологда, Россия, 160002; e-mail: mary1969@ya.ru

²Вологодский научный центр РАН, ул. Горького, д. 56 а, г. Вологда, Россия, 160014; e-mail: platonov70@ya.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 24.04.20 / Принята к печати 04.08.20

Аннотация. Расширение видовой разнообразия городских насаждений в условиях севера должно осуществляться с учетом физиологических особенностей интродуцируемых видов. Проанализированы зимостойкость и динамика содержания сахарозы в тканях однолетних побегов растений, произрастающих в малых городах Вологодской области, принята во внимание информация об естественных ареалах этих растений. Показано, что содержание сахарозы у изученных видов подвержено сезонным колебаниям, а также значительно варьирует в зависимости от географического происхождения вида. Для большинства деревьев характерны довольно высокий уровень зимостойкости и умеренные колебания сахарозы в течение года. Для кустарников – более высокое содержание сахарозы по сравнению с древесными видами и ее существенные колебания в течение вегетационного периода. У большинства исследованных растений в апреле–июне наблюдается минимальное содержание сахарозы, в осенние месяцы – повышение ее содержания, с ноября до весны – снижение. Виды, показавшие высокий уровень зимостойкости: бересклет европейский (*Euonymus europaeus* L.), дерен белый (*Cornus alba* L.), кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schldl.), клен гиннала (*Acer ginnala* Maxim.) – накапливают сахарозу к октябрю и затем плавно расходуют ее в осенне-зимне-весенний период. Кустарники-интродуценты, характеризующиеся низкой зимостойкостью: пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.), спирея иволистная (*Spiraea salicifolia* L.), снежноягодник белый (*Symphoricarpos albus* (L.) S.F. Blake) – максимум сахарозы запасают к октябрю–ноябрю, а затем в зимние месяцы быстро расходуют ее. Чубушник венечный (*Philadelphus coronarius* L.) отличается подмерзанием побегов до уровня снега, что, возможно, связано с практически полным расходом сахарозы к январю. Предложены варианты стратегий накопления и расходования сахаров растениями, относящимися к различным флористическим областям.

Для цитирования: Андропова М.М., Платонов А.В. Сахароза в тканях однолетних побегов древесных растений-интродуцентов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 62–76. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-62-76

Ключевые слова: интродуценты, зимостойкость, морозоустойчивость, сахара.

SUCROSE IN THE TISSUES OF ANNUAL SHOOTS OF INTRODUCED WOODY PLANTS

*Marina M. Andronova*¹, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-4480-2020](https://orcid.org/0000-0002-9654-8913),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9654-8913>

*Andrey V. Platonov*², Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-9310-2019](https://orcid.org/0000-0002-1110-7116),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1110-7116>

¹Vologda Institute of Law and Economics of the Federal Penitentiary Service of Russia,
ul. Shchetinina, 2, Vologda, 160002, Russian Federation; e-mail: mary1969@yandex.ru

²Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, ul. Gor'kogo, 56 a, Vologda,
160014, Russian Federation; e-mail: platonov70@yandex.ru

Original article / Received on April 24, 2020 / Accepted on August 4, 2020

Abstract. Expanding the species diversity of urban plantations in the North requires taking into account the physiological characteristics of introduced species. The paper analyzes the winter hardiness and dynamics of sucrose content in tissues of annual shoots of plants growing in towns of the Vologda region, considering their natural habitats. The authors show that the sucrose content in the studied species undergoes seasonal fluctuations and also varies significantly depending on the geographical origin of the species. Most of the studied trees are characterized by a fairly high level of winter hardiness, which occurs against the background of moderate fluctuations in sucrose content throughout the year. Shrubs, compared to trees, are characterized by higher content of sucrose and its significant fluctuations during the growing season. The minimum content of sucrose is observed from April till June in most of the studied plants; during the autumn months its content increases; and then from November to spring there is a decrease. Species that showed a high level of winter hardiness: European spindle (*Euonymus europaeus* L.), white dogwood (*Cornus alba* L.), hedge cotoneaster (*Cotoneaster lucidus* Schltdl.), and Amur maple (*Acer ginnala* Maxim.). They accumulate sucrose by October and then smoothly consume it during the autumn-winter-spring period. Introduced shrubs with low winter hardiness are the following: Atlantic ninebark (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.), Spiraea salicifolia (*Spiraea salicifolia* L.), and common snowberry (*Symphoricarpos albus* (L.) S.F. Blake). They accumulate maximum sucrose by October–November and then rapidly consume it during the winter months. English dogwood (*Philadelphus coronarius* L.) is known for freezing the shoots to the level of snow, which may be due to the almost complete consumption of sucrose by January. The article provides options for strategies of sugars accumulation and consumption by plants belonging to different floristic areas.

For citation: Andronova M.M., Platonov A.V. Sucrose in the Tissues of Annual Shoots of Introduced Woody Plants. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 62–76. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-62-76

Keywords: introduced species, winter hardiness, frost resistance, sugars.

Введение

Успешность интродукции новых видов в северных регионах ограничена комплексом сложных условий, особенно в холодное время года. Способность растений перезимовать определяется не только суровостью зимы, но и подготовленностью самих растений к холодному периоду и характеризуется заверше-

нием прохождения фенофаз сезонного развития, снижением физиологической активности в связи с переходом в состояние зимнего покоя. Все это зависит от особенностей погоды на протяжении вегетационного периода и генетически обусловленных потребностей вида.

Ряд факторов окружающей среды, включая фотопериодизм, температуру, аллелопатические взаимодействия растений, вызывают прекращение роста, акклиматизацию к холоду и другие адаптивные реакции растений. Правильный выбор этих реакций видом-интродуцентом особенно важен для его выживания в бореальной зоне [11, 32, 33, 37].

При этом именно зимостойкость признается многими исследователями определяющим фактором успешности интродукции древесных растений [10, 13–15, 18, 21, 22, 29, 31, 37, 42, 43, 46].

Анализ литературы, посвященной исследованиям в этой области, показал, что зимостойкость древесных растений зависит от комплекса физиологических и биохимических процессов, протекающих в клетках и тканях растений, их анатомического строения, генетически обусловленных экологических потребностей [6, 17, 18, 31, 32, 49].

Виды, приспособившиеся к новым, с заметными ежегодными изменениями температуры, условиям произрастания, разработали физиологические механизмы, которые позволяют чередовать периоды роста и покоя в фазе в зависимости от погоды, поэтому растение имеет необходимую зимостойкость [36] и при этом характеризуется хорошим ростом.

Многие исследования показывают, что биохимический состав клеток тканей растений играет ключевую роль в зимостойкости. При снижении температуры воздуха повышается содержание криопротекторов (сахаров, свободных аминокислот, органических и неорганических кислот), защищающих ткани от повреждений [3–7, 11, 18, 26, 34]. Криопротекторы, прежде всего сахара, понижают точку замерзания растворов в клетке, объем появляющегося льда, потери воды цитоплазмой клетки, количество свободной воды, способной пойти на льдообразование, в случае образования льда смягчают его действие на цитоплазму и мембраны клетки [6].

Следовательно, в повышении зимостойкости интродуцентов большую роль играет характер динамики запасных веществ в клетках тканей однолетних побегов. При понижении температуры окружающего воздуха в тканях растений происходит накопление растворимых сахаров, максимум содержания которых приходится на зимние месяцы [4, 7, 32, 41].

Способность растений переносить отрицательные температуры определяется наследственностью, но контролируется сигналами окружающей среды [36]. Зимостойкость одного и того же растения зависит от погодных условий, предшествующих наступлению морозов, влияющих на характер образования льда. Прекращение роста и индукция покоя необходимы для достижения максимального уровня устойчивости к холоду [23].

Основная часть работ, рассматривающих вопросы устойчивости растений к низкотемпературному стрессу, посвящена травянистым растениям и сельскохозяйственным культурам. И лишь некоторые содержат сведения об исследованиях древесных растений, включая фруктовые деревья, декоративные и важные в лесохозяйственном отношении виды [46].

В нашем исследовании внимание было уделено некоторым интродуцированным видам древесных растений, входящим в состав зеленых насаждений малых городов Вологодской области.

Цель работы – изучение закономерностей содержания водорастворимых сахаров (сахарозы) в тканях однолетних побегов древесных растений разного географического происхождения в связи с устойчивостью видов к суровым условиям Севера.

Объекты и методы исследования

Изучены произрастающие в малых городах Вологодской области (Грязовец, Кадников, Кириллов, Великий Устюг) и представляющие различные флористические области древесные виды-интродуценты: барбарис обыкновенный (*Berberis vulgaris* L.), бересклет европейский (*Euonymus europaeus* L.), вяз мелколистный (*Ulmus pumila* L.), дерен белый (*Cornus alba* L.), кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schlttdl.), клен гиннала (*Acer ginnala* Maxim.), пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.), роза морщинистая (*Rosa rugosa* Thunb.), снежнаягодник белый (*Symphoricarpos albus* (L.) S.F. Blake), спирея иволистная (*Spiraea salicifolia* L.), сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), сосна скрученная (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon), туя западная (*Thuja occidentalis* L.), чубушник венечный (*Philadelphus coronarius* L.).

Исследования вели полевым стационарным и лабораторным методами. Содержание сахарозы определяли в побегах текущего года, т. к. они более подвержены действию низких температур и более высокая уязвимость вершин побегов может защитить остальную часть ветви от зимнего повреждения [45]. Растительный материал (навеска 0,5–1,0 г побегов текущего года) измельчали и фиксировали 5 мл кипящего 96 %-го этанола на водяной бане при температуре 80 °С в течение 5 мин. Экстракцию сахаров проводили трижды 80 %-м этанолом на водяной бане при 80 °С в течение 10 мин. Полученные экстракты объединяли, центрифугировали и высушивали при комнатной температуре в фарфоровых чашках. Сухой остаток трижды смывали дистиллированной водой. Содержание сахарозы в полученном водном экстракте определяли по основанному на способности кетосахаров давать окраску с резорцином [16] методу Мак-Рери и Слаттери. Оптическую плотность – на спектрофотометре СФ-2000 (Россия, «Ломо») при длине волны 520 нм. Содержание сахарозы оценивали в миллиграммах на грамм сырой массы. Зимостойкость и морозоустойчивость растений классифицировали по шкалам Главного ботанического сада [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Глобальное потепление климата вызывает сдвиг границ ареалов видов [24, 35, 39]. Темпы их миграции, однако, отстают от скорости изменения климата [38]. Это обычно объясняется относительной жесткостью границ ареалов. Одиночные зимние морозы могут также гасить ответ растения на глобальное потепление [25]. Частота экстремально холодных явлений в последнее время уменьшается [19], но их интенсивность и продолжительность, как ожидается, останутся постоянными [28, 48]. Для Европы сокращение морского ледяного покрова в Баренцевом и Карском морях может даже увеличить вероятность

очень холодных зим [40]. Долгоживущие виды, такие как деревья и кустарники, должны выдерживать минимальные температуры, которые встречаются в интервалами в десятилетия [30].

Использование интродуцентов в условиях Вологодской области ограничивается устойчивостью растений к суровым климатическим условиям. Даже незначительные, но часто повторяющиеся повреждения однолетних побегов могут привести к гибели растений.

В течение года морозоустойчивость древесных растений изменяется очень сильно: максимальная наблюдается зимой, минимальная – летом. Кроме того, на содержание запасных веществ в клетках растений оказывают влияние поздневесенние и раннеосенние заморозки. Как отмечает И.И. Туманов [18, с. 152], «от осенних заморозков обычно страдают растения, отличающиеся слабой морозостойкостью вообще. Они характеризуются длительным периодом роста побегов, часто отсутствием к началу осени ярко выраженных верхушечных почек на однолетних побегах, слабым одревеснением побегов и недостаточной закалкой к морозам. Получив первые повреждения от осенних заморозков, такие растения еще больше страдают от сильных морозов зимой. В отличие от осенних заморозков весенние, как правило, повреждают древесные и кустарниковые виды и с хорошей морозостойкостью». Основная причина этого – малая требовательность морозостойких растений к теплу, что вызывает отклик у них на первое потепление. Спровоцированные на рост растения страдают от ранневесенних заморозков, повреждающих листья, побеги, у раннецветущих – бутоны и цветки. Повторная дефолиация в период поздневесенних заморозков уменьшает концентрацию сахаров и, как следствие, понижает последующую морозоустойчивость [47]. Результаты полевых наблюдений и данные математического моделирования указывают на повышенный риск повреждения растений поздневесенними заморозками, несмотря на общие тенденции потепления климата и более раннее начало вегетации [1, 2, 11, 14, 20]. Кроме того, зимостойкость древесных растений зависит от ряда факторов и в отдельные годы может смещаться в ту или иную сторону.

В связи с тем, что погодные условия предыдущего года играют важнейшую роль в накоплении запасных веществ в клетках древесных растений, исследование динамики содержания сахарозы в клетках тканей однолетних побегов изучаемых древесных видов проводилось в периоды активного роста и вынужденного покоя с сентября 2015 г. по август 2016 г.

В целом 2015 г. для Вологодской области был теплым. Весенне-летний период характеризовался более высокими температурами по сравнению с нормой. Переход через 0°C в сторону увеличения произошел с 28 марта по 2 апреля (раньше среднемноголетних сроков на 5–11 дней). Лишь в первой декаде июля отмечены аномалии температуры воздуха: среднесуточные температуры с 5 июля до конца декады были ниже нормы на $3\text{--}7^{\circ}\text{C}$; в ряде районов области наблюдали заморозки на почве.

Осенне-зимний период также характеризовался более теплым температурным режимом по сравнению с нормой. Продолжительность вегетационного периода составила 158–161 день при норме 152–164 дня [8]. В целом погодные условия весны, лета и начала осени 2015 г. создали благоприятные условия для накопления растениями запасных веществ.

Максимальное содержание сахарозы у изученных видов зафиксировано в октябре–ноябре – 0,305–0,962 мг/г в зависимости от вида. Накопление водорастворимых сахаров происходит летом за счет фотосинтеза, а также в конце осени, когда листья уже опали. Наличие сахарозы в клетках тканей побегов является типичным для лиственных древесных видов и связано с гидролизом крахмала в ответ на понижение температуры [27, 44, 45, 50]. Кроме того, в холодное время года ограничивается использование сахарозы на ростовые процессы, т. к. при низких температурах рост полностью ингибируется.

В осенний срок фиксации температура воздуха колебалась от +6 до +1 °С, т. е. соответствовала указанному ранее температурному диапазону, при котором крахмал превращается в сахара.

Минимальное содержание сахарозы у большинства видов зафиксировано в период с января по май (у некоторых видов падает до 0,019 мг/г), что можно связать с гидролизом сахара на глюкозу и фруктозу и расходом его на поддержание устойчивости в зимний период. После начала вегетации (май) уровень сахарозы постепенно растет за счет фотосинтеза и к августу у большинства растений превышает значение 0,200 мг/г (см. таблицу).

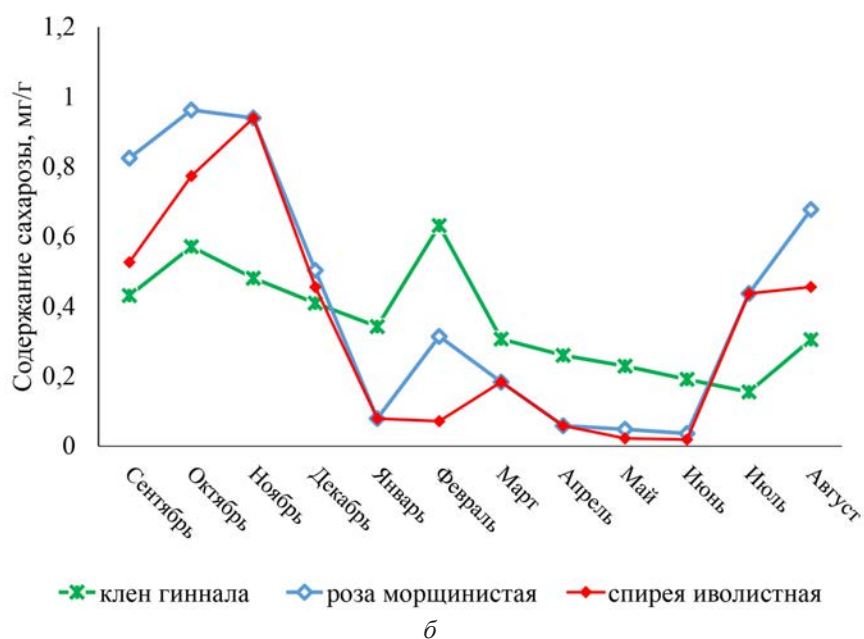
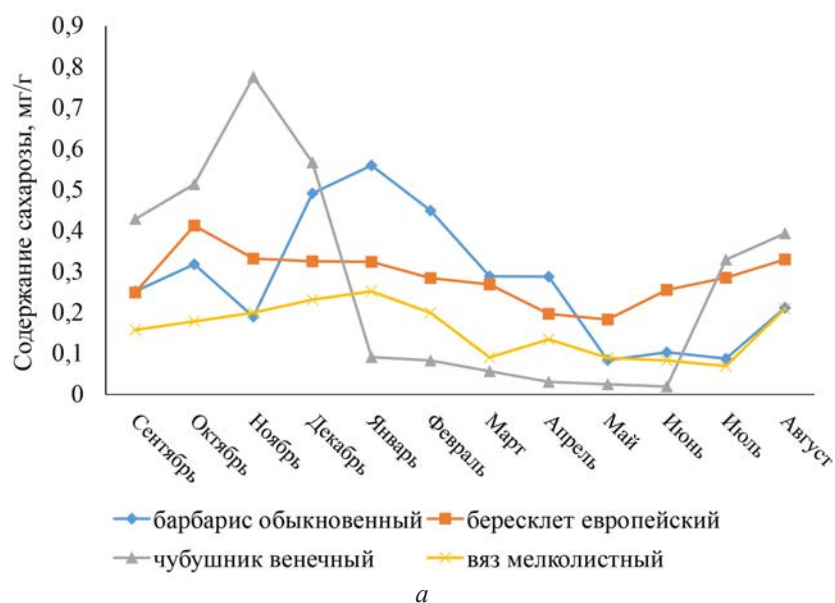
У изученных видов максимальное (минимальное) содержание сахара существенно варьирует по месяцам в течение изучаемого периода. На графиках (см. рисунок) прослеживается ярко выраженная дифференциация видов по вступлению в периоды зимнего максимума и летнего минимума.

В октябре с переходом через +5 °С в сторону понижения температуры, который произошел 12–14 октября, что на 4–9 дней позднее среднесезонных сроков в центральных и западных районах области и на 10–14 дней позднее в северных и восточных районах, наблюдается повышение содержания сахаров у всех исследованных видов. Это следует рассматривать как подготовку к зиме.

Зимний режим погоды (переход через 0 °С в сторону понижения) в области установился 26 ноября, на месяц позднее многолетних сроков [9]. В ноябре отмечен выход на максимум содержания сахарозы в клетках тканей побегов пузыреплодника калинолистного – 0,952 мг/г, спиреи иволистной – 0,939 мг/г, чубушника венечного – 0,775 мг/г. Для остальных видов зафиксировано незначительное снижение сахаров, что может свидетельствовать о некоторой физиологической перестройке растений из-за понижения температуры окружающего воздуха.

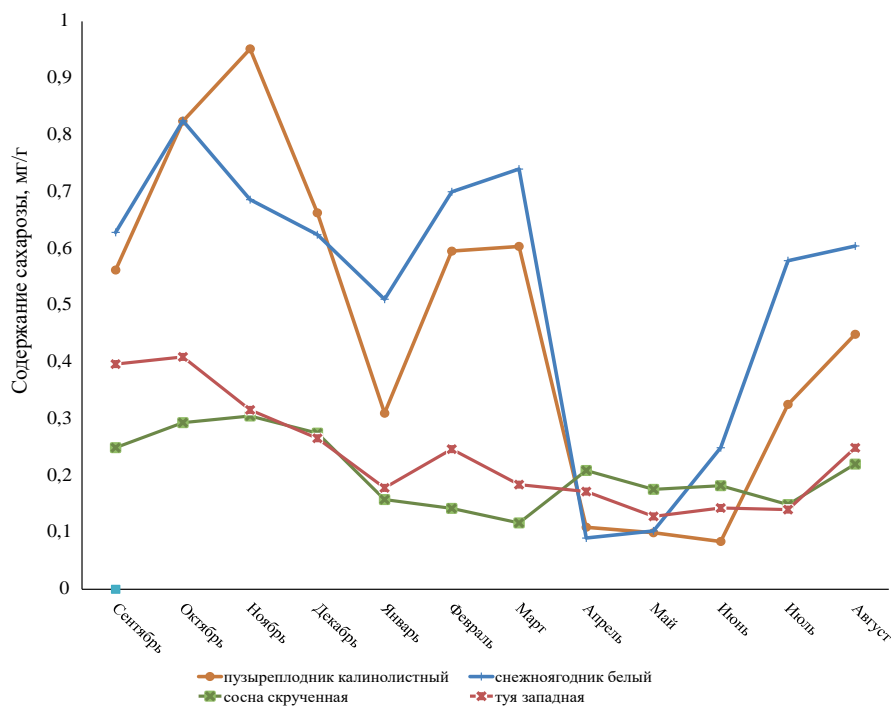
Начало 2016 г. отличалось аномально низкими температурами. Средняя температура первой декады января оказалась на 7–10 °С ниже нормы. В целом погода в январе была неустойчива: чередовались волны тепла и холода. В январе отмечались зимний минимум содержания сахаров у спиреи иволистной, чубушника венечного, розы морщинистой, пузыреплодника калинолистного, клена гиннала, снежноягодника белого и повышение содержания сахаров у дерена белого, барбариса обыкновенного, вяза мелколистного.

Холодная погода в третьей декаде апреля спровоцировала некоторый рост уровня сахаров в клетках однолетних побегов барбариса обыкновенного, вяза мелколистного. Для остальных видов характерно постепенное снижение содержания сахаров, что может свидетельствовать об израсходовании растениями всех запасных веществ в период низких температур.

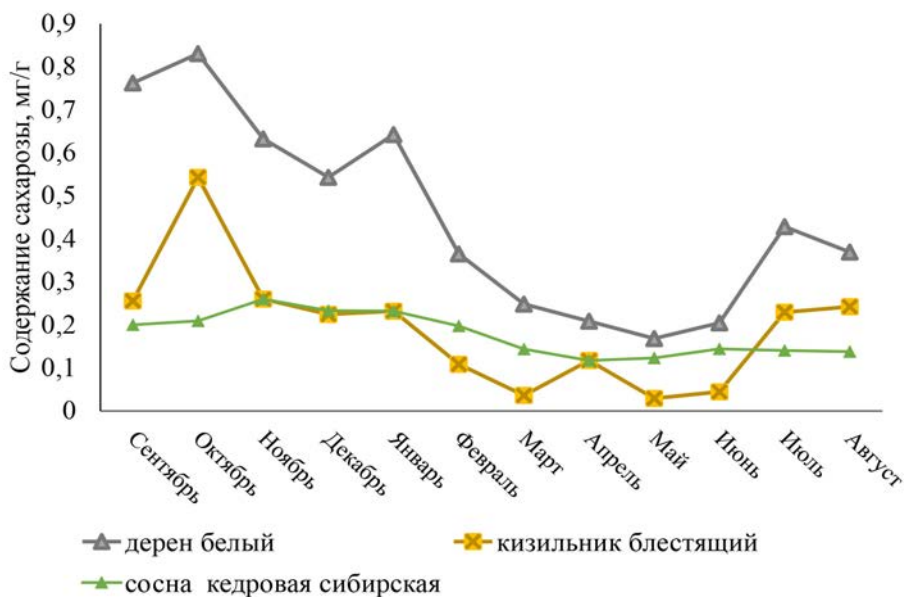


Динамика содержания сахарозы в однолетних побегах древесных видов-интродуцентов (мг/г): *a* – древесные виды из Южной Европы, Крыма, Средней Азии, с Кавказа; *б* – дальневосточные виды

Dynamics of sucrose content in annual shoots of woody introduced species, mg/g: *a* – woody species from Southern Europe, the Crimea, Central Asia, the Caucasus; *б* – Far Eastern species



6



2

Динамика содержания сахарозы в однолетних побегах древесных видов-интродуцентов (мг/г): *в* – североамериканские виды; *з* – сибирские виды

Dynamics of sucrose content in annual shoots of woody introduced species, mg/g: *в* – North American species; *з* – Siberian species

К началу вегетационного периода содержание сахаров в клетках тканей однолетних побегов интродуцированных видов снижается (см. рисунок) до 0,029–0,183 мг/г в зависимости от вида. Запасные вещества дополнительно расходуются на распускание почек, рост побегов и листьев, а у плодоносящих – на цветение. Однако запасы органических веществ должны тратиться не полностью. Часть их остается в тканях и может участвовать в восстановлении ассимиляционного аппарата после повреждения его поздневесенними заморозками или насекомыми. Для физиологической перестройки требуется время и определенный ход изменения внешних условий [18]. Так, в летний период при вегетации за счет фотосинтеза постепенно накапливаются сахара в клетках тканей побегов всех изучаемых видов. Наибольшие темпы прироста сахарозы отмечаются у розы морщинистой (0,036–0,962 мг/г), спиреи иволистной (0,019–0,939 мг/г), снежноягодника белого (0,90–0,825 мг/г).

Несмотря на то, что изученные виды отличаются как по абсолютному содержанию сахарозы, так и по его динамике в течение изучаемого периода, можно выявить общие закономерности. Например, содержание сахарозы и его динамика различны в зависимости от происхождения видов, их зимостойкости и жизненной формы (дерево, кустарник).

Древесные виды: вяз мелколистный, сосна скрученная, туя западная, сосна кедровая сибирская – характеризуются относительно невысоким накоплением сахарозы в осенний период и менее выраженными колебаниями ее содержания в зависимости от сезона. Диапазон изменений составляет не более 4 раз (см. таблицу). Можно предположить, что в поддержании зимостойкости данных видов важное значение имеют не только сахара, но и другие соединения (белки, липиды, аминокислоты). Все кустарниковые виды, напротив, характеризуются явно выраженным накоплением сахарозы осенью (максимумы приходятся на октябрь или ноябрь) и затем существенными колебаниями содержания сахара в зависимости от месяца. Диапазон изменений может достигать 10 раз и более.

Чубушник венечный (происхождение – Южная Европа) накапливает сахарозу в ноябре, а затем резко расходует ее к январю (колебания – свыше 40 раз), что происходит на фоне очень низкой зимостойкости растения (рис., *а*).

У кустарников, происходящих с Дальнего Востока (клен гиннала, роза морщинистая, спирея иволистная), осенний максимум сахарозы приходится на октябрь–ноябрь, к январю содержание сахара уменьшается, в феврале–марте повышается в 1,8–3,8 раза относительно января, а затем снижается до уровня летних месяцев (рис., *б*). Однако клен гиннала имеет высокую зимостойкость, а побеги розы морщинистой и спиреи иволистной как однолетние, так и многолетние подвержены повреждениям в зимний период (см. таблицу). И именно у этих растений в ноябре–январе заметно расходуются сахароза (падение в 10 раз).

Североамериканские виды кустарников (пузыреплодник калинолистный, снежноягодник белый) после осеннего максимума имеют заметное снижение содержания сахара к январю (1,5–3,0), в феврале и марте вновь происходит весьма ощутимое увеличение количества сахарозы (1,5–2,0 раза), затем – резкое расходование к апрелю и быстрое накопление после начала вегетации (рис., *в*). Такие существенные колебания сахарозы сопровождаются и значительными повреждениями растений в зимний период – IV балла по шкале зимостойкости Главного ботанического сада (см. таблицу).

Подготовленность древесных растений-интродуцентов к зиме

| Вид | Зимостойкость, балл [1] | Индекс обмерзания, % [1] | Содержание сахарозы | | |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|---|---------------|----------------|
| | | | краткая характеристика динамики в течение года | минимум, мг/г | максимум, мг/г |
| Барбарис обыкновенный | II | 6,2 | Значительные колебания | 0,084 | 0,559 |
| Бересклет европейский | I-II | 6,0 | Накопление к октябрю и плавное расходование | 0,183 | 0,412 |
| Дерен белый | II | 5,8 | | 0,168 | 0,830 |
| Кизильник блестящий | II | 5,3 | | 0,029 | 0,543 |
| Клен гиннала | I-II | 0,1 | Накопление к октябрю и плавное расходование с повышением концентрации в феврале | 0,155 | 0,631 |
| Пузыреплодник калинолистный | IV | 14,6 | Накопление к ноябрю, резкое снижение в январе, повышение в январе-марте и резкое падение в апреле | 0,326 | 0,952 |
| Роза морщинистая | III-IV | 11,7-20,0 | Накопление к октябрю, резкое падение в январе, повышение в феврале и плавное расходование | 0,036 | 0,962 |
| Снежноягодник белый | IV | 10,0-20,8 | Накопление к октябрю, снижение в январе с дальнейшим повышением с января по март и резким падением в апреле | 0,090 | 0,825 |
| Спирея иволистная | IV | 23,8-28,0 | Повышение к ноябрю, резкое падение в январе | 0,019 | 0,939 |
| Чубушник венечный | V | 33,3 | Повышение в ноябре, резкое снижение в январе без последующих колебаний | 0,019 | 0,775 |
| Вяз мелколистный | II-IV | 0,3-21,9 | Незначительные колебания в течение года | 0,069 | 0,252 |
| Сосна кедровая сибирская | II | 0,2 | Незначительные колебания с максимумом в ноябре | 0,112 | 0,260 |
| Сосна скрученная | I | 0,0 | | 0,117 | 0,305 |
| Туя западная | II | 0,0-10,9 | Накопление к октябрю, плавное снижение к январю и незначительные колебания с февраля по май | 0,128 | 0,409 |

Кустарники, естественный ареал которых – Сибирь (дерен белый, кизильник блестящий), максимум сахарозы накапливают в октябре, в ноябре–декабре она расходуется, в январе происходит некоторое повышение ее содержания (более выражено у дерена белого), затем, до мая, – плавное снижение. После начала активной вегетации сахароза вновь накапливается (рис., *з*).

У кустарников, выходцев из более южных районов (барбарис обыкновенный, бересклет европейский), общих закономерностей не выявлено. Если бересклет европейский характеризуется накоплением сахарозы к октябрю и ее равномерным расходом к маю, то у барбариса обыкновенного более выражены колебания сахарозы с максимумом в январе (см. рисунок, *а*).

Графики содержания водорастворимых сахаров в клетках тканей однолетних побегов исследуемых растений хорошо согласуются с данными, полученными в ходе оценки зимостойкости и морозоустойчивости изучаемых видов (см. таблицу).

У исследованных растений можно выделить несколько стратегий накопления и расходования сахарозы. Виды, более устойчивые к местным условиям и показавшие довольно высокие зимостойкость и морозоустойчивость (бересклет европейский, кизильник блестящий, дерен белый, клен гиннала), максимальное содержание сахарозы накапливают к октябрю, а затем в ноябре–марте расходуют ее довольно плавно, при этом она, вероятно, гидролизуеться на фруктозу и глюкозу, тем самым повышая общую концентрацию водорастворимых сахаров.

Интродуцированные виды деревьев (сосна кедровая сибирская, сосна скрученная, туя западная, вяз мелколистный) плавно накапливают и расходуют сахарозу без ярко выраженных минимумов и максимумов, что обеспечивает высокую/достаточно высокую устойчивость растения к холоду в зимних условиях.

У видов, обладающих относительно низкими зимостойкостью и морозоустойчивостью (спирея иволистная, чубушник венечный, пузыреплодник калинолистный), осеннее накопление сахарозы наступает позже – в ноябре, а в декабре–январе происходит резкое снижение ее содержания, что может свидетельствовать о более выраженной (повреждающей) реакции этой группы растений на понижение температуры.

Дерен белый и кизильник блестящий, имеющие сформированные в ходе эволюции механизмы адаптации к низким температурам воздуха, демонстрируют дифференциацию сахаров в течение зимнего покоя, характерную для аборигенных видов, с заметными минимумами и максимумами содержания сахара в зимний период.

Бересклет европейский, хотя и не имеет ярко выраженной дифференциации сахара в клетках тканей однолетних побегов, хорошо зарекомендовал себя в условиях Вологодской области.

Заключение

Полученные нами результаты подчеркивают эволюционную важность устойчивости к холоду у древесных видов, которая сохраняется, даже если растения в интродукционном испытании выращиваются в новых условиях. Содержание и динамика сахарозы в основном хорошо согласуются с данными по зимостойкости и морозоустойчивости растений.

Так, выделяются три группы растений-интродуцентов, отличающихся по накоплению и расходованию сахарозы.

Первая группа – наиболее устойчивые к местным условиям кустарники-интродуценты (бересклет европейский, кизильник блестящий, дерен белый, клен гиннала), накапливающие максимальное содержание сахарозы в октябрь–ноябре, а затем плавно расходующие ее.

Вторая группа – деревья-интродуценты (сосна скрученная, сосна кедровая сибирская, туя западная), характеризующиеся высоким уровнем зимостойкости на фоне плавного накопления и расходования сахарозы. Данные группы растений могут быть рекомендованы для озеленения малых северных городов.

Третья группа – кустарники-интродуценты (чубушник венечный, пузыреплодник калинолистный, спирея иволистная) – наиболее чувствительны к комплексу зимних условий. При продвижении этих видов на север могут потребоваться дальнейшие интродукционные испытания.

Таким образом, устойчивость к холоду и динамику содержания сахарозы в клетках тканей растений в разное время года следует учитывать при принятии решения об использовании видов в зеленом строительстве северных городов и поселков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андропова М.М. Зимостойкость и морозоустойчивость древесных видов в антропогенной среде Европейского Севера России // Успехи современного естествознания. 2018. № 5. С. 26–32. Andronova M.M. Winter Hardiness and Frost Resistance of Wood Species in the Anthropogenic Environment of European North of Russia. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2018, no. 5, pp. 26–32. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.36750>

2. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Долинская И.С. Интродуценты и экстразональные виды в антропогенной среде (на примере г. Вологды): моногр. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 184 с. Babich N.A., Karbasnikova E.B., Dolinskaya I.S. *Introduced and Extrazonal Species in Anthropogenic Environment (Case Study of the City of Vologda)*: Monograph. Arkhangelsk, IPC NArFU Publ., 2012. 184 p.

3. Бессчетнова Н.Н. Содержание жиров в клетках побегов плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 4. С. 48–55. Besschetnova N.N. Fat Content in Shoot Cells of Scotch Pine Elite Trees. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 4, pp. 48–55. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a5f/bpb6.pdf>

4. Бессчетнова Н.Н. Селекционно-генетические аспекты формирования, совершенствования и использования генофонда сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.): дис. ... д-ра с.-х. наук. Н. Новгород, 2016. 573 с. Besschetnova N.N. *Breeding and Genetic Aspects of the Formation, Improvement and Use of the Gene Pool of Scots Pine (Pinus sylvestris L.)*: Dr. Agric. Sci. Diss. Nizhny Novgorod, 2016. 573 p.

5. Бессчетнова Н.Н., Кулькова А.В. Содержание запасных питательных веществ в клетках тканей годичных побегов представителей рода ель (*Picea* L.) в условиях Нижегородской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 52–61. Besschetnova N.N., Kul'kova A.V. The Content of Reserve Nutrients in the Cells of Annual Shoot Tissues of the Representatives of the Spruce (*Picea* L.) Genus in Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.52>

6. Веретенников А.В. Физиология растений. М.: Акад. проект, 2006. 480 с. Veretennikov A.V. *Plant Physiology*. Moscow, Akademicheskij proyekt Publ., 2006. 480 p.

7. Воробьев Р.А. Эколого-физиологические особенности видов рода ель (*Picea* L.) при оценке перспективности интродукции в Нижегородской области: дис. ... канд. биол. наук. М., 2014. 247 с. Vorob'yev R.A. *Ecological and Physiological Features of Species of the Genus Spruce (Picea L.) when Assessing the Prospects of Introduction in the Nizhny Novgorod Region*: Cand. Biol. Sci. Diss. Moscow, 2014. 247 p.

8. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2015 году / Правительство Вологодской области, Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области. Вологда, 2016. 232 с. *Report on the Environmental State and Protection of the Vologda Region in 2015*. Government of the Vologda Region, Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Vologda Region. Vologda, Sad-ogorod Publ., 2016. 232 p.

9. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2016 году / Правительство Вологодской области, Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области. Вологда, 2017. 250 с. *Report on the Environmental State and Protection of the Vologda Region in 2016*. Government of the Vologda Region, Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Vologda Region. Vologda, Sad-ogorod Publ., 2017. 250 p.

10. Залывская О.С. Комплексная оценка адаптивной способности интродуцентов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 161–166. Zalyvskaya O.S. Comprehensive Evaluation of Adaptive Capacity of Introduced Species. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 6, pp. 161–166. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ea7/2/-kompleksnaya-otsenka-adaptivnoy-sposobnosti-introdutsentov.pdf>

11. Залывская О.С., Бабич Н.А. Зимостойкость и морозостойчивость интродуцентов // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 1. С. 105–110. Zalyvskaya O.S., Babich N.A. Winter Hardiness and Resistance to Frost Introduced Species. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2014, no. 1, pp. 105–110.

12. Латин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М., 1973. С. 7–67. Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessment of Prospects for the Introduction of Woody Plants according to Visual Observations. *Experience of Woody Plant Introduction*. Moscow, 1973, pp. 7–67.

13. Лысиков А.Б. К вопросу о зимостойкости декоративных культур // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 44. С. 39–43. Lysikov A.B. Issue of Winter Hardiness of Ornamental Crops. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2016, no. 44, pp. 39–43.

14. Малаховец П.М., Тисова В.А. Зимостойкость интродуцированных древесных растений в условиях Севера // Изв. вузов. Лесн. журн. 1995. № 2-3. С. 25–30. Malakhovets P.M., Tisova V.A. Winter Hardiness of Introduced Woody Plants in the North. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1995, no. 2-3, pp. 25–30. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5a2/25_29.pdf

15. Мартынов Л.Г. Ритм сезонного развития и зимостойкость европейских видов древесных растений в подзоне средней тайги Республики Коми // Изв. СамНЦ РАН. 2015. Т. 17, № 5. С. 155–159. Martynov L.G. Rhythm of Seasonal Development and Winter Hardiness of European Woody Plants in the Middle Taiga Subzone of Komi Republic. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 155–159.

16. Методы биохимического исследования растений / под ред. А.И. Ермакова. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с. *Methods of Biochemical Analysis of Plants*. Ed. by A.I. Ermakov. Leningrad, Agropromizdat Publ., 1987. 430 p.

17. Трунова Т.И. Растение и низкотемпературный стресс: доложено на LXIV ежегодном Тимирязевском чтении 3 июня 2003 г. М.: Наука, 2007. 54 с. Trunova T.I. *A Plant and Low Temperature Stress*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 54 p.

18. Туманов И.И. Физиологические основы зимостойкости культурных растений. М.; Л.: Сельхозгиз, 1940. 366 с. Tumanov I.I. *Physiological Basis of Winter Hardiness of Cultivated Plants*. Moscow, Sel'hozgiz Publ., 1940. 366 p.
19. Allen S., Barros V., Burton I., Campbell-Lendrum D., Cardona O., Cutter S. et al. Summary for Policymakers. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Ed. by C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, Q. Dahe. Cambridge, Cambridge University Press, 2012, pp. 3–22. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>
20. Augspurger C.K. Reconstructing Patterns of Temperature, Phenology, and Frost Damage over 124 Years: Spring Damage Risk is Increasing. *Ecology*, 2013, vol. 94, iss. 1, pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.1890/12-0200.1>
21. Cavender-Bares J. Impacts of Freezing on Long Distance Transport in Woody Plants. *Vascular Transport in Plants*. Ed. by N.M. Holbrook, M.A. Zwieniecki. USA, Academic Press, 2005, pp. 401–424. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012088457-5/50021-6>
22. Charra-Vaskou K., Charrier G., Wortemann R., Beikircher B., Cochard H., Ameglio H., Mayr S. Drought and Frost Resistance of Trees: A Comparison of Four Species at Different Sites and Altitudes. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69, iss. 3, pp. 325–333. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0160-5>
23. Dormling I. Bud Dormancy, Frost Hardiness, and Frost Drought in Seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Advances in Plant Cold Hardiness*. Ed. by P.H. Li, L. Christersson. Boca Raton, FL, CRC Press, 1993, pp. 285–298. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351069526-20>
24. Grabherr G., Gottfried M., Pauli H. Climate Effects on Mountain Plants. *Nature*, 1994, vol. 369, p. 448. DOI: <https://doi.org/10.1038/369448a0>
25. Jalili A., Jamzad Z., Thompson K., Araghi M.K., Ashraf S., Hasaninejad M., Panahi P., Hooshang N., Azadi R., Tavakol M.S., Palizadar M., Rahmanpour A., Farghadan F., Mirhosaini S.G., Parvaneh K. Climate Change, Unpredictable Cold Waves and Possible Brakes on Plant Migration. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, vol. 19, iss. 5, pp. 642–648. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00553.x>
26. Kalberer S.R., Wisniewski M., Arora R. Deacclimation and Reacclimation of Cold-Hardy Plants: Current Understanding and Emerging Concepts. *Plant Science*, 2006, vol. 171, iss. 1, pp. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.02.013>
27. Kasuga J., Arakawa K., Fujikawa S. High Accumulation of Soluble Sugars in Deep Supercooling Japanese White Birch Xylem Parenchyma Cells. *New Phytologist*, 2007, vol. 174, iss. 3, pp. 569–579. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02025.x>
28. Kodra E., Steinhäuser K., Ganguly A.R. Persisting Cold Extremes under 21st-Century Warming Scenarios. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38, iss. 8, art. L08705. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GL047103>
29. Krasova N.G. Parameters of Apple Tree Variety Resistant to Winter Unfavorable Conditions. *Vestnik OrelGAU*, 2013, vol. 2(41), pp. 73–77.
30. Kreyling J. Winter Climate Change: A Critical Factor for Temperate Vegetation Performance. *Ecology*, 2010, vol. 91, iss. 7, pp. 1939–1948. DOI: <https://doi.org/10.1890/09-1160.1>
31. Kreyling J., Schmid St., Aas G. Cold Tolerance of Tree Species is Related to the Climate of Their Native Ranges. *Journal of Biogeography*, 2015, vol. 42, iss. 1, pp. 156–166. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.12411>
32. Larcher W. Resistenzphysiologische Grundlagen der evolutiven Kälteakklimatisierung von Sproßpflanzen. *Plant Systematics and Evolution*, 1981, vol. 137, pp. 145–180. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00989871>
33. Larcher W. *Physiological Plant Ecology*. Berlin, Springer, 2003. 513 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05214-3>

34. Lemoine D.G., Granier A., Cochard H. Mechanism of Freeze-Induced Embolism in *Fagus sylvatica* L. *Trees*, 1999, vol. 13, no. 4, pp. 206–210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004680050234>
35. Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., de Ruffray P., Brisse H. A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation during the 20th Century. *Science*, 2008, vol. 320, iss. 5884, pp. 1768–1771. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1156831>
36. Levitt J. *Responses of Plants to Environmental Stresses*. Vol. 1. New York, Academic Press, 1980. 497 p.
37. Li Ch., Puhakainen T., Welling A., Viherä-Aarnio A., Ernstsén A., Junttila O., Heino P., Palva E.T. Cold Acclimation in Silver Birch (*Betula pendula*). Development of Freezing Tolerance in Different Tissues and Climatic Ecotypes. *Physiologia Plantarum*, 2002, vol. 116, iss. 4, pp. 478–488. DOI: <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1160406.x>
38. Nathan R., Horvitz N., He Y., Kuparinen A., Schurr F.M., Katul G.G. Spread of North American Wind-Dispersed Trees in Future Environments. *Ecology Letters*, 2008, vol. 14, iss. 3, pp. 211–219. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01573.x>
39. Parmesan C., Yohe G. A Globally Coherent Fingerprint of Climate Change Impacts across Natural Systems. *Nature*, 2003, vol. 421, pp. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01286>
40. Petoukhov V., Semenov V.A. A Link between Reduced Barents-Kara Sea Ice and Cold Winter Extremes over Northern Continents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, vol. 115, iss. D21, art. D21111. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009JD013568>
41. Sakai A. Studies on the Frost-Hardiness of Woody Plants. I. The Causal Relation between Sugar Content and Frost-Hardiness. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, 1962, no. B11, pp. 1–40.
42. Sakai A., Larcher W. *Frost Survival of Plants*. Berlin, Springer, 1987. 321 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-71745-1>
43. Sakai A., Weiser C.J. Freezing Resistance of Trees in North America with Reference to Tree Regions. *Ecology*, 1973, vol. 54, iss. 1, pp. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.2307/1934380>
44. Sauter J.J., Kloth S. Changes in Carbohydrates and Ultrastructure in Xylem Ray Cells of *Populus* in Response to Chilling. *Protoplasma*, 1987, vol. 137, pp. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01281175>
45. Sauter J.J., van Cleve B. Storage, Mobilization and Interrelations of Starch, Sugars, Protein and Fat on the Ray Storage Tissue of Poplar Trees. *Trees*, 1994, vol. 8, pp. 297–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00202674>
46. Strimbeck G.R., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröder W.P., Kjellsen T.D. Extreme Low Temperature Tolerance in Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, art. 884. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00884>
47. Thomas F.M., Meyer G., Popp M. Effects of Defoliation on the Frost Hardiness and the Concentrations of Soluble Sugars and Cyclitols in the Bark Tissue of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). *Annals of Forest Science*, 2004, vol. 61, no. 5, pp. 455–463. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2004039>
48. Vavrus S., Walsh J.E., Chapman W.L., Portis D. The Behavior of Extreme Cold Air Outbreaks under Greenhouse Warming. *International Journal of Climatology*, 2006, vol. 26, pp. 1133–1147. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1301>
49. Wisniewski M., Gusta L.V. The Biology of Cold Hardiness: Adaptive Strategies Preface. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, vol. 106, pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.03.001>
50. Yamada Y., Awano T., Fujita M., Takabe K. Living Wood Fibers Act as Large-Capacity “Single-Use” Starch Storage in Black Locust (*Robinia pseudoacacia*). *Trees*, 2011, vol. 25, iss. 4, pp. 607–616. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0537-3>

УДК 630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-77-87

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ НА ОСТРОВЕ БОЛЬШОМ СОЛОВЕЦКОМ

А.Н. Соболев¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318).

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

П.А. Феклистов², д-р с.-х. наук, проф.; Researcher ID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X).

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

¹Соловецкий музей-заповедник, пос. Соловецкий, Приморский р-н, Архангельская обл., 163000; e-mail: alex-sobol@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: pfeklistov@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 04.04.20 / Принята к печати 25.06.20

Аннотация. Исследования выполнены на Большом Соловецком острове в Белом море. Цель – выявление особенностей сосняков в наиболее распространенных условиях местопроизрастания на Большом Соловецком острове. Заложены 34 пробные площади в преобладающих типах сосновых лесов: брусничных, черничных и сфагновых. На каждой пробной площади подобраны и обмеряны учетные деревья, взяты керны (у 64 деревьев на каждой пробной площади) для определения возраста. Показано, что древостои отличаются низким бонитетом и, соответственно, низкими запасами древесины. Класс бонитета в сосняках брусничных и сфагновых – Va, в черничных – V. Запас древесины в брусничных сосняках составляет 92 м³/га, в черничных – 90 м³/га, в сфагновых – 53 м³/га при достаточно близком среднем возрасте – 109–114 лет. Средние диаметры в древостоях относительно высокие, а средние высоты, наоборот, низкие. Диаметр в сосняках брусничном и черничном – соответственно 21 и 22 см, а высоты – 12 и 14 м. Древостои преимущественно разновозрастные: одновозрастный сосняк отмечен лишь на одной пробной площади, это 3 % от общего количества, 21 % древостоев – условно разновозрастные, а все остальные – разновозрастные. Наиболее типичны абсолютная и цикличная разновозрастность. В черничных и сфагновых лесах значительна доля условно разновозрастных сосняков. Деревья в лесах всех типов имеют очень низкую относительную высоту. В среднем она равна для сосняков брусничных 63 см/см, для черничных – 61 см/см, для сфагновых – 55 см/см (т. е. на каждый сантиметр диаметра дерева увеличиваются в высоту на 55...63 см в зависимости от типа леса) и меньше относительной высоты материковых сосняков на 36–45 %. Это свидетельствует о том, что деревья на Большом Соловецком острове сильносбежистые. Установлена отрицательная корреляционная связь относительной высоты с возрастом.

Для цитирования: Соболев А.Н., Феклистов П.А. Особенности строения сосновых древостоев на острове Большом Соловецком // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 77–87. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-77-87

Финансирование: Исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН (№ ГР 122011400384-2).

Ключевые слова: сосняки, типы леса, возрастная структура, относительная высота, средний диаметр, средняя высота, островные популяции.

FEATURES OF THE STRUCTURE OF PINE STANDS ON BOLSHOY SOLOVETSKY ISLAND

*Aleksandr N. Sobolev*¹, Candidate of Agriculture, Senior Researcher Scientist;

ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

*Pavel A. Feklistov*², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

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

¹Solovetsky Museum-Reserve, pos. Solovetsky, Primorskiy District, Arkhangelsk Region, 163000, Russian Federation; e-mail: alex-sobol@mail.ru

²N. 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; e-mail: pfeklistov@yandex.ru

Original article / Received on April 4, 2020 / Accepted on June 25, 2020

Abstract. The studies were carried out on Bolshoy Solovetsky Island in the White Sea. The research purpose is to identify the features of pine forests in the most frequent growing conditions on the island. For this purpose, 34 sampling areas were laid out in the prevailing types (cowberry, blueberry, and sphagnum) of pine forests. In each sampling area reference trees were selected and measured, and core samples were taken from 64 trees for age determination. The paper shows that the stands are characterised by low quality class and therefore low timber stocks. The quality class in cowberry and sphagnum pine forests is Va; and in blueberry pine forests it is V. Timber stock in cowberry, blueberry and sphagnum pine forests is 92, 90 and 53 m³/ha, respectively, with a fairly close average age of 109–114 yrs. The average diameters in the stands are relatively high, while the average heights, on the other hand, are low. The diameter in cowberry and blueberry pine forests is 21 and 22 cm, respectively, and the height is 12 and 14 m, respectively. Forest stands are mostly uneven-aged. An even-aged pine forest was found in only one sampling area, which is 3 % of the total amount; 21 % of stands are relatively uneven-aged, and all the rest are uneven-aged. Absolute age difference and cyclical age difference are the most typical. There is a significant share of relatively uneven-aged pine stands in blueberry and sphagnum forests. Trees in all forest types have a very low relative height. On average, it is equal to 63 cm/cm for cowberry pine forests, 61 cm/cm for blueberry pine forests, and 55 cm/cm for sphagnum pine forests, i.e. for every centimeter of diameter, trees grow in height by 55–63 cm depending on the forest type, and 36–45 % lower than the relative height in mainland pine forests. This indicates that the trees on Bolshoy Solovetsky Island are highly tapering. A negative correlation between relative height and age has been found.

For citation: Sobolev A.N., Feklistov P.A. Features of the Structure of Pine Stands on Bolshoy Solovetsky Island. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 77–87. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-77-87

Funding: The studies were carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS (No. ГП 122011400384-2).

Keywords: pine forests, forest types, age structure, relative height, average diameter, average height.

Введение

Остров Большой Соловецкий – крупнейший остров Белого моря. Его максимальная протяженность с севера на юг составляет 24 км, с запада на восток – 16 км.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

Ближайшее расстояние до материка – 23 км, поэтому сосняки на Соловках в определенной степени являются изолированными популяциями. Они занимают более трети покрытой лесом площади архипелага. Островное положение, суровые условия в центре Белого моря и существенная ветровая нагрузка не могли не сказаться на древостоях этого региона.

Все леса подвергались антропогенному воздействию. В XV в. на острове был основан Соловецкий монастырь, а в XX в. появились Соловецкий лагерь особого назначения и поселок. На их территории проводились активные работы, велась заготовка древесины, но сплошные рубки применялись в крайне ограниченном объеме. Такая деятельность человека повлияла на биологическое разнообразие и строение лесов [29].

На сегодняшний день Соловецкие острова являются объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО, леса отнесены к защитным, имеющим научное и историческое значение, т. е. признана их высокая важность и ценность. Сведения о лесах Соловецкого архипелага есть в литературе [9, 10, 25 и др]. Однако все вопросы, касающиеся особенностей сосновых древостоев этой местности и природопользования, далеко не исчерпаны [30].

Цель исследований – выявление особенностей сосняков в наиболее распространенных типах леса на Большом Соловецком острове.

Объекты и методы исследования

На территории архипелага в наиболее распространенных типах сосновых лесов – брусничных, черничных и сфагновых, – занимающих 82 % территории сосняков, заложены 34 пробные площади. Все они располагаются в координатах 64°58'–65°06' с. ш.; 35°46'–36°01' в. д. Древостой сосняков лишайниковых и сфагновых чистые по составу, а в брусничных и черничных есть небольшая примесь березы и осины.

Пробные площади закладывались в соответствии с общепринятыми методиками и рекомендациями [1, 3, 6, 8, 19, 22, 23 и др.]. Выполнялся комплекс работ по лесоводственному, таксационному и геоботаническому описанию. Для исследования возрастной структуры древостоя у учетных деревьев в различных типах леса (по 64 дерева на пробной площади) с помощью приростного бурава Haglof у шейки корня отбирали керны по случайно взятому радиусу с учетом методических рекомендаций [2, 14, 15, 26].

Подсчет годичных колец для определения возраста модельных деревьев проводили при помощи микроскопа МБС-10. Расчеты таксационных характеристик – в соответствии с рекомендациями И.И. Гусева [7].

Результаты исследования и их обсуждение

Леса Соловецкого архипелага слагаются 4 породами: елью, сосной, березой и осиной. На их долю соответственно приходится 7980,4; 6525,9; 3542,1 и 954,3 га, а общая площадь лесов – 19 004,5 га [25]. Преобладающими типами сосняков на Соловецких островах являются сосняки брусничные, черничные и сфагновые (рис. 1): соответственно 25, 32 и 19 % покрытой лесом территории. Именно в сосняках этих типов закладывали пробные площади. Таким образом, исследованиями охвачена значительная часть сосновых лесов.

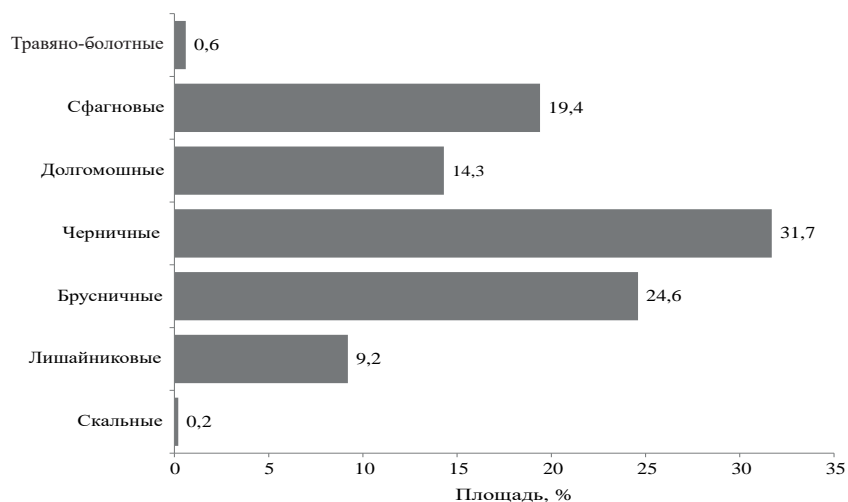


Рис. 1. Распределение площади сосняков по типам леса

Fig. 1. Area distribution of pine forests by forest types

Сосняки характеризуются относительно высоким средним диаметром древостоев. Самый большой диаметр у сосняков черничных – 22,4 см, далее по убыванию у сосняков брусничных – 20,5 см и у сосняков сфагновых – 16,0 см (табл. 1, 2). Полностью привести результаты статистической обработки данных, полученных на 34 пробных площадях, не представляется возможным, поэтому приведем их в усеченном виде по типам леса с указанием пределов колебания статистического показателя. Как видно из табл. 2, все средние показатели по пробным площадям получены с достаточно высокой точностью и достоверны при уровне значимости 0,05.

Таблица 1

Характеристика сосняков по типам леса

| Тип леса | Средний диаметр, см | Средняя высота, м | Полнота | | Средний возраст, лет | Бонитет (средневзвешенный) | Относительная высота, см/см | Пробные площади, шт. |
|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| | | | абсолютная, м ² /га | относительная | | | | |
| Сосняк брусничный | 20,5 | 11,7 | 15,1 | 0,59 | 123 | Va | 62,5 | 11 |
| Сосняк черничный | 22,4 | 14,0 | 12,9 | 0,48 | 109 | V | 61,5 | 11 |
| Сосняк сфагновый | 16,0 | 8,2 | 11,6 | 0,56 | 114 | Va | 54,7 | 12 |

Обращает на себя внимание низкая средняя высота древостоев (см. табл. 1, 2). Она, как и диаметр, определена с достаточно высокой точностью и достоверна. Если сосняки черничные и брусничные по высоте различаются не сильно, то высота в черничном типе леса почти в 2 раза больше по сравнению с высотой в сосняке сфагновом.

Таблица 2

**Статистические показатели диаметров и высот
по типам леса ($t = 2,0$ для уровня значимости 0,05)**

| Статистический показатель | Диаметр, см | | | Высота, м | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Сосняк бруснич-ный | Сосняк чернич-ный | Сосняк сфагновый | Сосняк бруснич-ный | Сосняк чернич-ный | Сосняк сфагновый |
| M, см/см | <u>20,5</u> 13,6–28,4 | <u>22,4</u> 16,5–29,4 | <u>16,0</u> 11,7–19,9 | <u>11,7</u> 9,2–13,4 | <u>14,0</u> 10,8–17,5 | <u>8,2</u> 5,6–11,4 |
| m, см/см | <u>1,1</u> 0,4–1,7 | <u>1,4</u> 1,0–1,8 | <u>0,8</u> 0,5–1,0 | <u>0,3</u> 0,2–0,5 | <u>0,5</u> 0,4–0,8 | <u>0,2</u> 0,2–0,3 |
| σ , см/см | <u>9,1</u> 3,5–13,8 | <u>10,9</u> 9,0–15,0 | <u>6,6</u> 3,9–8,3 | <u>2,5</u> 1,7–3,8 | <u>3,4</u> 2,9–6,0 | <u>1,9</u> 1,5–2,7 |
| V, % | <u>44,8</u> 25,5–61,4 | <u>49,3</u> 34,8–58,8 | <u>41,0</u> 30,8–47,9 | <u>22,4</u> 14,3–32,6 | <u>25,8</u> 19,1–29,8 | <u>24,9</u> 16,4–32,1 |
| P, % | <u>5,6</u> 3,2–7,7 | <u>6,6</u> 4,3–8,2 | <u>5,1</u> 3,8–6,0 | <u>2,6</u> 1,7–3,7 | <u>3,3</u> 2,2–4,7 | <u>3,0</u> 2,0–4,0 |
| t | <u>19,1</u> 13,0–28,5 | <u>31,4</u> 13,8–23,0 | <u>19,8</u> 17,0–26,0 | <u>37,6</u> 26,4–56,0 | <u>25,2</u> 12,9–41,9 | <u>33,0</u> 24,9–48,7 |

Примечание: В числителе – среднее значение, в знаменателе – min и max; M – среднее значение; m – ошибка среднего значения; σ – среднеквадратическое отклонение; V – коэффициент вариации; P – точность; t – достоверность (критерий Стьюдента).

Полнота в лесах всех типов схожа – 0,5–0,6. Возраст всех сосняков – от 109 до 123 лет. Достаточно высокий возраст и небольшая высота говорят о низкой продуктивности. Класс бонитета изменяется на разных пробных площадях: в брусничном и сфагновом типах леса – от V к Va, в черничном – от IV к Va. Средневзвешенный бонитет в сосняках брусничных и сфагновых – Va, в черничных – V. Низкую продуктивность отражает и запас древесины по типам леса. Он определен через сумму площадей сечений, высоту и видовые числа. Последние брали из работы [24] для чистых сосновых древостоев. Запас в брусничных сосняках составляет 92 м³/га, в черничных – 90 м³/га, в сфагновых – 53 м³/га.

Для леса важное значение имеет возрастная структура древостоев. На каждой пробной площади с учетом данных о возрасте 64 деревьев была изучена возрастная структура с использованием рекомендаций Г.Е. Комина [11, 12]. В результате выявлено, что только на одной пробной площади, в сосняке брусничном, древостой одновозрастный (табл. 3), во всех остальных случаях древостои разновозрастные в различных вариациях. В сосняках черничных и сфагновых на 25–27 % пробных площадей произрастает разновозрастный древостой, в сосняках брусничных – на 9 %. Абсолютное большинство древостоев во всех типах леса разновозрастные, причем преобладают циклично и абсолютно разновозрастные и очень мало ступенчато разновозрастных (по классификации [11, 12]). Средний максимальный и минимальный возрасты в разных типах леса имеют весьма близкие значения: минимальный – 60–66 лет, а максимальный – 173–197 лет.

Таблица 3

Возрастная структура сосняков

| Тип леса | Пробные площади, шт., сосняков | | | | | Возраст древостоя, лет | | |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------|------------|------------------------|--------------|-------------|
| | одно-возрастных | условно разновозрастных | разновозрастных | | | средний | максимальный | минимальный |
| | | | циклично | абсолютно | ступенчато | | | |
| Сосняк брусничный | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 123 | 197 | 66 |
| Сосняк черничный | – | 3 | 5 | 2 | 1 | 109 | 181 | 64 |
| Сосняк сфагновый | – | 3 | 7 | 2 | – | 114 | 174 | 60 |

Самой распространенной во всех типах сосняков является циклично разновозрастная структура (рис. 2).

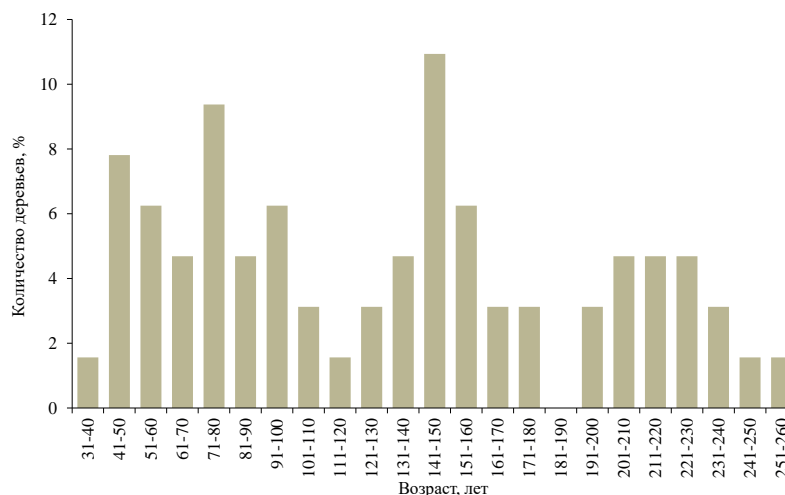


Рис. 2. Циклично разновозрастная структура в сосняке брусничном (пробная площадь № 99)

Fig. 2. Cyclically uneven-aged structure in the cowberry pine forest (sampling area No. 99)

Для каждой пробной площади был определен и средний возраст по типам леса (см. таблицу 1), а также все другие статистические показатели, которые свидетельствуют о высокой (в среднем – 5,1 %) точности полученного среднего возраста и достоверности средних значений (критерий Стьюдента составил в среднем 24,8).

Особого внимания заслуживает оценка относительной высоты $H:D$ (отношения высоты к диаметру) в сосняках Соловков. Данный термин был предложен Я.С. Медведевым в конце XIX в. для характеристики светолюбия древесных пород [14, 17]. Относительная высота характеризует скорость роста в высоту по отношению к скорости роста по диаметру (показывает, на сколько сантиметров увеличивается высота при увеличении диаметра на каждый сантиметр). На от-

носительную высоту, как и на высоту, влияет климат [31]. Отмечено, что относительная высота зависит от степени конкуренции деревьев в древостое. Медведев определил предельные относительные высоты у изолированных и у наиболее угнетенных деревьев [16]. Для сосен первой категории этот показатель оказался равным 24,9, а второй – 126,0.

Понятие относительной высоты широко использовалось во многих отечественных и зарубежных исследованиях [4, 18, 27, 28, 32]. Большая работа по обоснованию $H:D$ в качестве характеристики некоторых биологических особенностей насаждений была проведена К.К. Высоцким [5]. На основе специально выполненных исследований он доказал, что относительная высота – не только показатель связи древесных пород и насаждений с условиями среды, но и показатель развития древостоев, степени напряженности роста и плотности заселения территории.

Относительная высота может рассматриваться как важный классификационный признак деревьев и древостоев и как критерий устойчивости дерева к снеговым и ветровым нагрузкам. Она является дополнительным показателем формы ствола наряду с традиционными коэффициентами формы. Чем больше значение, тем полндревеснее ствол [13].

Относительные высоты в сосняках брусничных и черничных довольно близки и составляют соответственно 62,6 и 60,8 см/см (табл. 4). В сфагновом сосняке относительная высота меньше, чем в черничном, на 6 см/см. Сравнение относительной высоты соловецких лесов с относительной высотой древостоев тех же типов леса на материке в Архангельской области свидетельствует об их существенном отличии. В материковых древостоях относительная высота выше на 36–45 %. Низкие значения данного показателя у сосен в островных популяциях говорят о том, что деревья здесь являются сильноосбежистыми. По-видимому, это связано, с одной стороны, с невысокой полнотой древостоев, а с другой, с интенсивной ветровой нагрузкой, обусловленной островным положением.

Таблица 4

Относительная высота сосны в разных типах леса на Соловках и в материковых насаждениях Архангельской области

| Тип леса | Относительная высота, см/см | | Различие, % |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------|
| | на Соловках | в Архангельской области [20, 21] | |
| Сосняк брусничный | 62,6 | 84,9 | 36 |
| Сосняк черничный | 60,8 | 88,7 | 44 |
| Сосняк сфагновый | 54,7 | 79,2 | 45 |

Результаты расчета статистических показателей по отдельным пробным площадям и типам леса приведены в табл. 5. Точность средних значений в большинстве случаев не превышает 5 %, все показатели достоверны. Относительные высоты не менее 68 % деревьев в лишайниковом и брусничном типах леса находятся в пределах 33,4...106,1 см/см, в сфагновом – 28,3...98,2 см/см, в черничном – 29,1...104,7 см/см.

Таблица 5

**Статистические показатели относительной высоты по типам леса
и пробным площадям ($t = 2,0$ для уровня значимости $0,05$)**

| Статистический показатель | Номер пробной площади (сосняки брусничные) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 075 | 080 | 089 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | |
| М, см/см | 54,7 | 52,8 | 51,3 | 89,4 | 62,0 | 61,1 | 50,8 | 72,0 | 84,8 | 49,6 | 59,5 | |
| m, см/см | 1,9 | 1,8 | 2,2 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 1,7 | 2,8 | 2,7 | 2,0 | 2,0 | |
| σ , см/см | 15,1 | 14,2 | 17,8 | 16,3 | 16,2 | 17,2 | 14,0 | 22,4 | 21,2 | 15,9 | 16,3 | |
| V, % | 27,7 | 26,9 | 34,8 | 18,3 | 26,2 | 28,1 | 27,5 | 31,1 | 25,0 | 32,1 | 27,3 | |
| t | 28,9 | 29,7 | 22,8 | 43,8 | 30,6 | 28,5 | 29,1 | 25,7 | 32,0 | 25,0 | 29,3 | |
| P, % | 3,5 | 3,4 | 4,4 | 2,3 | 3,3 | 3,5 | 3,4 | 3,9 | 3,1 | 4,0 | 3,4 | |
| Статистический показатель | Номер пробной площади (сосняки черничные) | | | | | | | | | | | |
| | 001 | 002 | 003 | 004 | 005 | 006 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | |
| М, см/см | 58,7 | 86,8 | 67,1 | 60,6 | 43,7 | 56,4 | 70,3 | 52,2 | 59,6 | 67,1 | 53,8 | |
| m, см/см | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,1 | 2,0 | 3,1 | 2,1 | 1,6 | 2,3 | 2,7 | 1,9 | |
| σ , см/см | 17,2 | 17,8 | 18,6 | 14,9 | 14,6 | 22,0 | 17,1 | 13,2 | 18,8 | 21,9 | 15,0 | |
| V, % | 29,2 | 20,6 | 27,7 | 24,5 | 33,5 | 39,1 | 24,3 | 25,3 | 31,4 | 32,7 | 27,8 | |
| t | 14,9 | 21,8 | 14,4 | 16,3 | 11,9 | 18,4 | 33,0 | 31,7 | 25,4 | 24,5 | 28,8 | |
| P, % | 4,1 | 2,8 | 3,8 | 3,4 | 4,6 | 5,4 | 3,0 | 3,2 | 3,9 | 4,1 | 3,5 | |
| Статистический показатель | Номер пробной площади (сосняки сфагновые) | | | | | | | | | | | |
| | 046 | 090 | 092 | 097 | 099 | 100 | 101 | 102 | 104 | 105 | 106 | 107 |
| М, см/см | 43,3 | 55,1 | 48,7 | 42,8 | 60,3 | 77,9 | 61,0 | 69,1 | 56,9 | 59,3 | 40,4 | 41,4 |
| m, см/см | 1,8 | 1,5 | 2,2 | 1,4 | 2,4 | 2,5 | 1,9 | 2,1 | 1,5 | 1,9 | 1,5 | 1,6 |
| σ , см/см | 14,2 | 12,2 | 17,9 | 11,2 | 19,0 | 20,2 | 15,3 | 17,1 | 12,4 | 15,0 | 12,1 | 12,9 |
| V, % | 32,8 | 22,1 | 36,8 | 26,2 | 31,5 | 26,0 | 25,1 | 24,7 | 21,8 | 25,4 | 29,9 | 31,2 |
| t | 23,6 | 36,2 | 21,8 | 30,5 | 25,4 | 30,8 | 31,9 | 32,4 | 36,8 | 31,5 | 26,8 | 25,7 |
| P, % | 4,2 | 2,8 | 4,6 | 3,3 | 3,9 | 3,2 | 3,1 | 3,1 | 2,7 | 3,2 | 3,7 | 3,9 |

Следует отметить наличие обратной корреляционной зависимости относительной высоты от возраста деревьев. Чем выше возраст, тем меньше относительная высота. Коэффициент корреляции для сосняков брусничных – 0,63; для сфагновых – 0,60; для черничных – 0,52.

Выводы

1. Преобладающими типами сосновых лесов на Большом Соловецком острове являются сосняки брусничные, черничные и сфагновые.

2. Древостои отличаются низким бонитетом и, соответственно, низкими запасами древесины. Средние диаметры относительно высокие, а средние высоты, наоборот, низкие.

3. Древостои преимущественно разновозрастные, наиболее типичны абсолютная и цикличная разновозрастность. В черничных и сфагновых типах леса значительна доля условно разновозрастных сосняков.

4. Деревья во всех типах леса имеют очень низкую относительную высоту. Она меньше относительной высоты материковых сосняков на 36–45 %.

Это свидетельствует о том, что деревья островных популяций являются сильносбежистыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.

2. Битвинскас Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 172 с. Bitvinskis T.T. *Dendroclimatic Studies*. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1974. 172 p.

3. Бузова Н.В., Феклистов П.А. Антропогенная трансформация пригородных лесов. Архангельск: АГТУ, 2007. 264 с. Burova N.V., Feklistov P.A. *Anthropogenic Transformation of Suburban Forests*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 264 p.

4. Верхунов П.М. Закономерности строения разновозрастных сосняков. Новосибирск: Наука, 1976. 254 с. Verkhunov P.M. *Regularities of the Structure of Uneven-Aged Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 254 p.

5. Высокый К.К. Закономерности строения смешанных древостоев. М.: Гослесбумиздат, 1962. 177 с. Vysotskiy K.K. *Regularities of the Structure of Mixed Stands*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 177 p.

6. ГОСТ 16128–70. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: Изд-во стандартов, 1971. 23 с. State Standard. *GOST 16128–70. Forest Management Trial Areas. Methods of Laying out*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1971. 23 p.

7. Гусев И.И. Таксация древостоя. Архангельск: АГТУ, 2000. 72 с. Gusev I.I. *Stand Valuation*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2000. 72 p.

8. Гусев И.И., Калинин В.И. Лесная таксация. Л.: ЛТА, 1988. 61 с. Gusev I.I., Kalinin V.I. *Forest Inventory*. Leningrad, LTA Publ., 1988. 61 p.

9. Ипатов Л.Ф. Кедр на Соловках: (науч.-попул. очерк). Архангельск, 2005. 36 с. Ipatov L.F. *Cedar on the Solovki: (Science Popular Essay)*. Arkhangelsk, 2005. 36 p.

10. Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В. Соловецкий лес. Архангельск, 2005. 225 с. Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prourzin L.I., Torkhov S.V. *Solovetsky Forest*. Arkhangelsk, 2005. 225 p.

11. Комин Г.Е. К вопросу о типах возрастной структуры насаждений // Изв. вузов. Лесн. журн. 1963. № 3. С. 37–42. Komin G.E. To the Issue of the Types of Age Structure of Plantations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1963, no. 3, pp. 37–42. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1963/Лесной%20Журнал%20№%203%201963.pdf>

12. Комин Г.Е. Возрастная структура древостоев в лесах России. Сочи: НИИгорлескол, 2003. 219 с. Komin G.E. *Age Structure of Stands in Russian Forests*. Sochi, NIIGorlesekol Publ., 2003. 219 p.

13. Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 168 с. Maslakov E.L. *Formation of Pine Young Stands*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 168 p.

14. Матвеев С.М. Дендрохронология. Воронеж: ВГЛТА, 2001. 88 с. Matveyev S.M. *Dendrochronology*. Voronezh, VGLTA Publ., 2001. 88 p.

15. Матвеев С.М. Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной лесостепи. Воронеж: ВГУ, 2003. 272 с. Matveyev S.M. *Dendroindication of the Dynamics of Pine Plantations in the Central Forest Steppe*. Voronezh, VSU Publ., 2003. 272 p.

16. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 407 с. Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 407 p.
17. Морозов Г.Ф. Учение о лесе. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 455 с. Morozov G.F. *The Doctrine of the Forest*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1949. 455 p.
18. Нагимов В.З., Артемьева И.Н., Нагимов З.Я. Дифференциация и отпад деревьев в сосняках лишайниковых заповедно-природного парка «Сибирские увалы» // Леса России и хозяйство в них: Сб. науч. тр. / Федер. агентство по образованию, УГЛТУ; АН РФ, Урал. отд-ние, Ботан. сад. 2007. Вып. 1(29). С. 138–146. Nagimov V.Z., Artem'yeva I.N., Nagimov Z.Ya. Differentiation and Drop-off of Trees in Lichen Pine Forests of the Siberian Uvaly Nature Reserve. *Forests of Russia and Management in Them: Collection of Academic Papers*. Yekaterinburg, USFEU, 2007, iss. 1(29), pp. 138–146.
19. ОСТ 56-69–83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки: дата введения 1984-01-01. М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1984. 60 с. *Industrial Standard. OST 56-69–83. Forest Management Trial Areas. Method of Laying out*. Moscow, TsBNTI Gosleskhozа SSSR Publ., 1984. 60 p.
20. Полевой лесотаксационный справочник / под общ. ред. С.В. Третьякова, С.В. Ярославцева, С.В. Коптева. Архангельск: САФУ, 2016. 252 с. *Field Forest Valuation Handbook*. Ed. by S.V. Tret'yakov, S.V. Yaroslavtsev, S.V. Koptev. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 252 p.
21. Полевой справочник таксатора (для таежных лесов Европейского Севера) / сост. И.И. Гусев, В.И. Калинин, О.А. Неволин, Н.М. Нефедов, Н.А. Шишкин. Вологда: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1971. 196 с. *Field Handbook of a Cruiser (for Taiga Forests of the European North)*. Content by I.I. Gusev, V.I. Kalinin, O.A. Nevolin, N.M. Nefedov, N.A. Shishkin. Vologda, Severo-Zapadnoye knizhnoye izdatel'stvo, 1971. 196 p.
22. Сукачев В.Н. Программа и методика биогеоценологических исследований / под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1966. 332 с. Sukachev V.N. *Program and Method of Biogeocenological Research*. Ed. by V.N. Sukachev, N.V. Dylis. Moscow, Nauka Publ., 1966. 332 p.
23. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса М.: АН СССР, 1961. 144 с. Sukachev V.N., Zonn S.V. *Methodology Guidelines for the Study of Forest Types*. Moscow, AN SSSR Publ., 1961. 144 p.
24. Третьяков С.В. Динамика формирования и продуктивность смешанных сосновых древостоев средней подзоны тайги Европейского Севера России: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2011. 43 с. Tret'yakov S.V. *Dynamics of Formation and Productivity of Mixed Pine Stands in the Middle Taiga Subzone of the European North of Russia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2011. 43 p.
25. Феклистов П.А., Соболев А.Н. Лесные насаждения Соловецкого архипелага (структура, состояние, рост). Архангельск: САФУ, 2010. 201 с. Feklistov P.A., Sobolev A.N. *Forest Plantations of the Solovetsky Archipelago (Structure, State, and Growth)*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 201 p.
26. 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 Characteristics of Pine Growth in the Northern Subzone of the European Taiga*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1997. 140 p.
27. Юкнис Р.А. Некоторые закономерности роста деревьев // Моделирование и контроль производительности древостоев: сб. науч. тр. ЛитСХА. Каунас, 1983. С. 118–120. Yuknis R.A. Some Regularities of Tree Growth. *Modeling and Control of Stand Productivity: Collection of Academic Papers of the LitSKhA*. Kaunas, 1983, pp. 118–120.
28. Erteld W. Groesse und Entwicklung des h/d-Wertes in Kieferbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 1979, Jg. 150, S. 72–75.

29. Kärkkäinen L., Kurttila M., Salminen O., Viiri H. Effects of Energy Wood Harvesting on Timber Production Potential and Biological Diversity in North Karelia, Finland. *Forest Science*, 2014, vol. 60, iss. 6, pp. 1077–1088. DOI: <https://doi.org/10.5849/forsci.13-041>

30. Larsen J.B., Nielsen A.B. Nature-Based Forest Management. Where are We Going? Elaborating Forest Development Types in and with Practice. *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 238, iss. 1-3, pp. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.087>

31. Sharma M., Subedi N., Ter-Mikaelian M., Parton J. Modeling Climatic Effects on Stand Height/Site Index of Plantation-Grown Jack Pine and Black Spruce Trees. *Forest Science*, 2015, vol. 61, iss. 1, pp. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.5849/forsci.13-190>

32. Thomasius H.O., Butter D. Studie zueinigen Relationen zwischen Wuchsfleaeche, Zuwachs und individueller Stabilitaet von Waldbaeumen, dargestellt an der Baumart Fichte. *Beitraege f. d. Forstwirtschaft*, 1984, B. 18, H. 1, S. 25–28.

УДК 528.856:630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-88-97

ИЗМЕНЕНИЕ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА АЗЕРБАЙДЖАНА ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

В.М. Мамедалиева, канд. геогр. наук; 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;

e-mail: valide.mamedaliyeva@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 16.03.20 / Принята к печати 29.06.20

Аннотация. Одними из наиболее ценных природных ресурсов любой страны являются ее лесные ресурсы. Их нужно беречь. Необходимость охраны лесов существует и в Азербайджане, где на каждого жителя приходится меньше леса, чем в соседних странах. Применение современных методов получения и обработки данных, а также технологий географических информационных систем позволяет свести исследования в этой области к набору стандартных процедур. На примере северо-восточного региона Азербайджана описан процесс обработки спутниковых снимков, имеющихся в открытом доступе, для составления карт лесного покрова за несколько разных лет. Изучены космические снимки со спутников Landsat, полученные во время летних сезонов за различные годы в период с 1987 по 2018 г. Снимки охватывали территорию 5 соседних районов, находящихся на северо-востоке Азербайджана. Предварительная обработка материала включала радиометрическую калибровку и атмосферную коррекцию и была проведена с помощью программного пакета ENVI и модуля FLAASH. Показан процесс окончательной обработки снимков в программе ArcGIS с целью определения площадей, занимаемых лесными массивами в разные годы. Анализ основывался на расчете вегетационного индекса NDVI для всех рассматриваемых изображений. Затем на них выделены участки, имеющие высокие значения NDVI, произведена векторизация, и найдены площади полученных полигонов. Таким образом, для каждого года создан отдельный тематический слой, отражающий площадь лесного покрова в этом году, т. е. всего 3 слоя. Полученные данные сведены в таблицу, по которой построена диаграмма, показывающая динамику изменений площади леса в регионе. Они также стали основой для тематической электронной карты исчезновения лесов. Охарактеризовано продолжение этого процесса.

Для цитирования: Мамедалиева В.М. Изменение лесных массивов северо-восточного региона Азербайджана по космическим снимкам // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 88–97. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-88-97

Ключевые слова: спутниковые снимки, радиометрическая калибровка, атмосферная коррекция, нормализованный разностный индекс растительности, лесной покров, исчезновение леса.

CHANGES IN FORESTED AREAS OF THE NORTH-EASTERN REGION OF AZERBAIJAN REVEALED BY SATELLITE IMAGES

Valida M. Mamedaliyeva, Candidate of Geography; ResearcherID: [AAC-5454-2021](https://orcid.org/0000-0002-8775-8564),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-8564>

Institute of Ecology of the Azerbaijan National Aerospace Agency, ul. S.S. Akhundova, 1, Baku, AZ1115, Republic of Azerbaijan; e-mail: valide.memmedaliyeva@mail.ru

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Original article / Received on March 16, 2020 / Accepted on June 29, 2020

Abstract. Among the most valuable natural resources of any country are its forest reserves. They need to be preserved. The need for forest protection also exists in Azerbaijan, where there is less forest per inhabitant than in neighboring countries. The use of modern data acquisition and processing methods as well as geographical information system technologies has reduced research in this area to a set of standard procedures. The article describes the stages of processing satellite images available in the public domain, using the case study of the north-eastern region of Azerbaijan, in order to compile forest cover maps over a number of different years. The Landsat images obtained during the summer seasons in different years from 1987 to 2018 are studied. The images covered the territory of 5 neighboring districts in the north-east of Azerbaijan. Preliminary processing of the images included radiometric calibration and atmospheric correction and was carried out using the ENVI software and the FLAASH module. The article also shows the final processing of images using the ArcGIS program in order to determine the areas covered by forests in different years. The analysis was based on the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The index was calculated for all considered satellite images. Then sections of images with high NDVI values were highlighted, vectorized, and the areas of the resulting polygons were found. Thus, a separate thematic layer is created for each year, showing the area of forest cover that year, i.e. 3 layers in total. The data obtained were summarized in a table, from which a diagram showing the dynamics of the forest area in the region was created. The data also became the basis for a thematic electronic map of forest loss. The continuation of this process has been described.

For citation: Mamedaliyeva V.M. Changes in Forested Areas of the North-Eastern Region of Azerbaijan Revealed by Satellite Images. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 88–97. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-88-97

Keywords: satellite images, radiometric calibration, atmospheric correction, normalized difference vegetation index, forest cover, forest loss.

Введение

Леса – один из наиболее ценных природных ресурсов Азербайджана. Они включают в себя почву, воду, древесную и кустарниковую растительность, зоофауну, деревья, кусты, растительность, дикую природу и микроорганизмы, которые взаимно влияют друг на друга в процессе развития. В XVIII–XIX вв. 30–35 % современной территории Азербайджана было покрыто лесами, в настоящее время – только 11 % (989,4 тыс. га), что является весьма низким показателем по сравнению, например, с Российской Федерацией, где лес занимает 44 % площади страны.

Уничтожение лесов, поглощающих углекислый газ из атмосферы, приводит к росту выбросов парниковых газов. Глобальное загрязнение окружающей среды уже стало причиной снижения иммунитета и ухудшения здоровья людей, появления новых болезней [1].

Ситуация, сложившаяся в лесном хозяйстве, требует применения новейших методов управления и контроля. В числе этих методов есть компьютерные и информационные технологии. Несомненно, одна из главных составляющих современной системы управления лесным хозяйством – это электронная карта лесного покрова, указывающая местоположение всех субъектов, относящихся к данной тематике. Также чрезвычайно важно иметь возможность моделирования

состояния леса, чтобы на основе сделанных прогнозов планировать мероприятия по охране и оздоровлению лесов [16]. Таким образом, поиск новых инструментов для работы в данном направлении, в т. ч. программного обеспечения, актуален.

Картографирование является важным аспектом изучения растительного покрова, эффективным методом его пространственной инвентаризации, оценки динамики и биоразнообразия. Составление или обновление карт растительности – одна из задач, эффективно решаемых в настоящее время с помощью съемки из космоса на основе ГИС [3, 11].

Цель – определение площади лесного участка на изучаемой территории в разные периоды времени и оценка изменений лесного ландшафта. Территория площадью 6850 км² расположена на северо-востоке Азербайджанской Республики и охватывает Кусарский, Губинский, Хачмазский, Шабранский и Сиазаньский районы (рис. 1).



Рис. 1. Северо-восточный регион Азербайджана

Fig. 1. North-eastern region of Azerbaijan

Объекты и методы исследования

Для решения задачи использовались данные дистанционного зондирования 1987, 2000 и 2018 гг. со спутников Landsat 5 и Landsat 8. Данные были получены с помощью сайта Геологической службы США Earth Explorer [13]. Названия файлов и даты съемки следующие: LT05_L1TP_167031_19870829_20170211_01_T1 – снимок 29-го августа 1987 г.; LT05_L1TP_167031_20000731_20161214_01_T1 – снимок 31-го июля 2000 г.; LC08_L1TP_167031_20180701_20180716_01_T1 – снимок 1-го июля 2018 г. Сами изображения приведены на рис. 2.

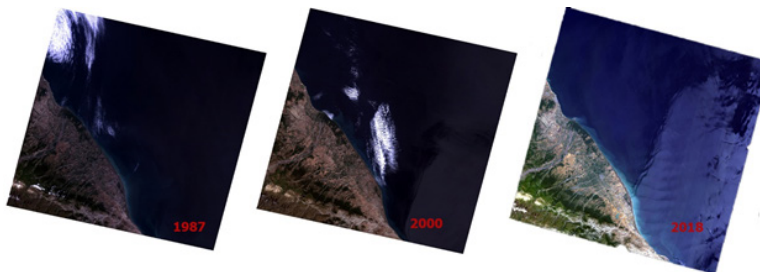


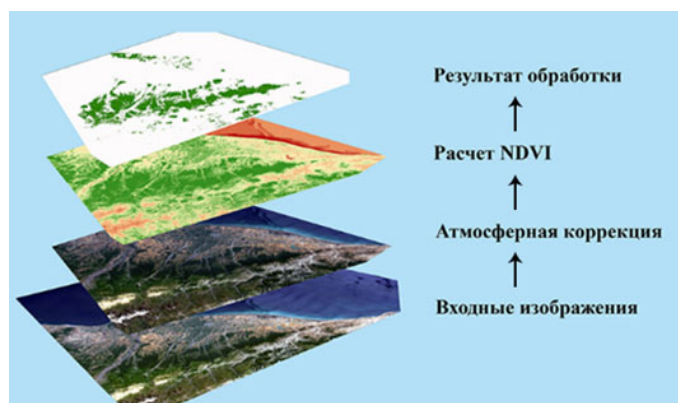
Рис. 2. Снимки региона, полученные со спутников Landsat в 1987, 2000 и 2018 гг. (слева направо)

Fig. 2. Landsat images of the considered region obtained in 1987, 2000 and 2018 (from left to right)

Предварительная обработка данных. Снимки, в том виде, в каком они представлены на сайте <https://earthexplorer.usgs.gov/>, уже прошли несколько этапов обработки, в частности геометрической: учтена кривизна поверхности Земли и особенности рельефа территории, применено масштабирование в пределах возможных значений регистрируемых величин и т. п. После этих коррекций можно изучать текстуру снимков, рассчитывать параметры взаимного расположения объектов, а также их форму. Другими словами, снимки готовы к визуальному дешифрированию. Однако для расчета спектральных характеристик, которые требуются, например, для определения вегетационных индексов, материалы еще не готовы. Это обусловлено тем, что значения, содержащиеся в файлах каналов многозонального изображения, представляют собой безразмерную величину, пропорциональную интенсивности излучения, достигающего сенсора Landsat. Таким образом, в файле находятся только так называемые сырые значения DN (Digital Numbers – числовые значения) [6, 18, 20]. Чтобы иметь возможность сравнивать данные различных съемок, необходимо провести коррекцию искажений, возникающих из-за параметров используемого сенсора, угла падения солнечных лучей, форм рельефа и влияния атмосферы. Поэтому предварительная обработка спутниковых данных включает также радиометрическую калибровку и атмосферную коррекцию [4, 7]. Этапы обработки изображений показаны на рис. 3.

Рис. 3. Этапы обработки данных

Fig. 3. Data processing stages



Для проведения радиометрической калибровки относительные единицы DN должны быть преобразованы в интенсивность излучения R от объектов, достигшего орбиты Landsat [19].

$$R = M_R DN + A_R$$

где M_R и A_R – специфичные для каждого спектрального канала калибровочные коэффициенты, которые приводятся в файле метаданных, находящемся в одном архиве с изображениями всех спектральных каналов.

Как радиометрическая, так и атмосферная коррекция были проведены с помощью программного обеспечения ENVI 5.3. Модуль радиометрической калибровки позволяет откалибровать пиксели изображения по излучению, отражающей способности или температуре. Он осуществляет пересчет значений DN в значения яркости на сенсоре R и сохраняет их в формате .bip или .bil. В этом виде данные готовы для проведения атмосферной коррекции посредством модуля FLAASH [14].

Солнечное излучение, отраженное от поверхности Земли, вследствие взаимодействия с атмосферой доходит до спутника в измененном виде. Цель применения атмосферной коррекции – определить первоначальную отражательную способность поверхности и восстановить физические параметры поверхности Земли, в т. ч. за счет устранения атмосферных воздействий – поверхностную отражательную способность [15].

В модуле FLAASH производятся следующие действия: по отражению в зонах 660 и 2100 нм оценивается содержание аэрозолей и газа; на основе различных моделей-шаблонов, учитывающих географическую широту, время года и тип местности, осуществляется очистка изображения.

Набор моделей, заложенных в FLAASH, обеспечивает атмосферную коррекцию изображений, полученных с любого мульти- и гиперспектрального датчика [2].

Составление карт лесов. Дальнейшая обработка данных проведена с помощью широко применяемой программы ArcGIS. Для определения районов, занятых густой растительностью, рассчитан нормализованный разностный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – наиболее распространенный для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова, индекс [17]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR и RED – отражения соответственно в ближней инфракрасной и красной областях спектра.

Известно, что в красной области спектра (0,6–0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7–1,0 мкм) – максимум отражения клеточных структур листа [5]. Получается, чем больше отражение в инфракрасной области спектра и чем меньше в красной, тем более вероятно наличие густой растительности, т. е. лесного покрова, на территории, показанной в этой части изображения. Таким образом, отношение данных показателей позволяет отделять лесные зоны от прочих природных объектов. Использование нормализованного индекса увеличивает точность измерения и уменьшает влияние различий в освещенности снимка, облачности и потерь на распространение отраженного сигнала в атмосфере. В табл. 1 приведены индексы для различных классов объектов [12].

Таблица 1

Индекс NDVI для некоторых классов природных объектов

| Тип объекта | Отражение | | NDVI |
|--|---------------------------|--------------------------------|--------|
| | в красной области спектра | в инфракрасной области спектра | |
| Густая растительность | 0,1 | 0,5 | 0,7 |
| Разряженная растительность | 0,1 | 0,3 | 0,5 |
| Открытая почва | 0,250 | 0,300 | 0,025 |
| Облака | 0,25 | 0,25 | 0 |
| Снег и лед | 0,375 | 0,350 | –0,050 |
| Вода | 0,02 | 0,01 | –0,25 |
| Искусственные материалы (бетон, асфальт) | 0,3 | 0,1 | –0,5 |

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4 показано изображение, полученное на основе вычислений по приведенной выше формуле расчета вегетационного индекса NDVI. Изображение сгенерировано с помощью инструмента Band Arithmetic, входящего в состав модуля ArcGIS Image Analyst. Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения, и чем больше зеленая фитомасса, тем они выше [10].

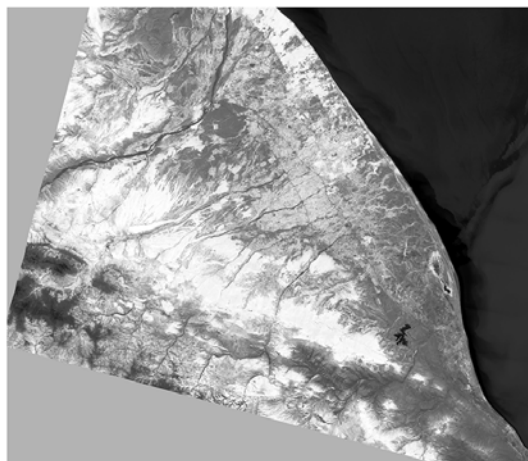


Рис. 4. Изображение, полученное путем расчета индекса NDVI

Fig. 4. An image obtained by NDVI calculation

С помощью инструмента Classification все пиксели изображения разбиты на два диапазона: лесной массив и участки без лесного покрытия. К лесному массиву отнесены пиксели с яркостью выше 0,7. Итог реклассификации показан на рис. 5: зеленым цветом обозначены области лесного покрова по результатам анализа снимка 2018 г., белым – безлесные участки.

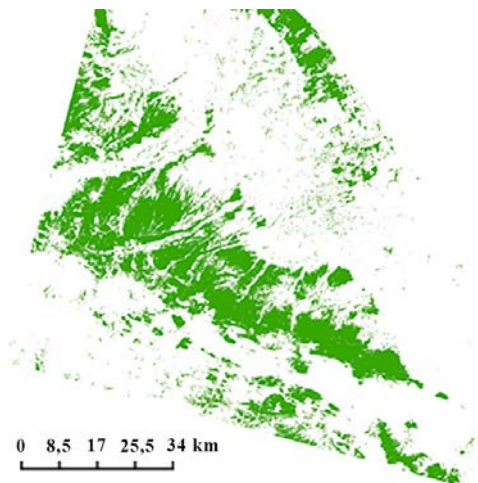


Рис. 5. Лесные и безлесные участки исследуемой территории

Fig. 5. Forested (shown in green) and bare (no color) sites of the studied area

Аналогично обработаны изображения 1987 и 2000 гг. Для составления карты исчезновения лесов на всех трех снимках пикселям участков без лесного покрытия было присвоено значение 100 %-й прозрачности, а сами изображения наложены друг на друга так, чтобы самое новое оказалось сверху, а самое старое – внизу. Результат показан на рис. 6: красный цвет – лесной покров по данным 1987 г., черный – по данным 2000 г., зеленый – по данным 2018 г.

Таким образом, красный цвет говорит о том, что еще в 1987 г. на обозначенных им участках произрастал лес, черный – что леса были здесь еще в 2000 г. К 2018 г. осталось только отмеченное зеленым.

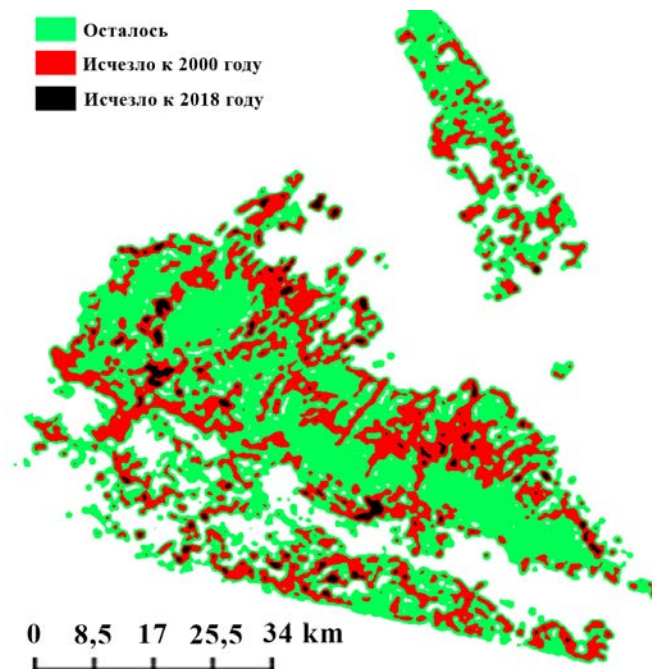


Рис. 6. Карта исчезновения лесов с 1987 по 2018 г.

Fig. 6. Map of forest loss from 1987 to 2018

Для расчета цифровых показателей исчезновения лесов растровые изображения разных лет были конвертированы в векторный формат. Затем с помощью инструмента Statistics определены площади лесного покрова отдельных лет. Результаты вычислений показаны в табл. 2.

Таблица 2

Изменение площади лесного покрова по годам

| Показатель | 1987 | 2000 | 2018 | |
|--|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Площадь лесного покрова, км ² | 1476,9 | 1322,4 | 1241,6 | |
| Осталось лесного покрова, % | 100 (по отношению к 1987 г.) | 89,5 (по отношению к 1987 г.) | 84,1 (по отношению к 1987 г.) | 93,9 (по отношению к 2000 г.) |
| Исчезло лесного покрова, % | – | 10,5 (по отношению к 1987 г.) | 15,9 (по отношению к 1987 г.) | 6,1 (по отношению к 2000 г.) |
| Среднегодовая скорость исчезновения, % | – | 0,81 (с 1987 по 2000 гг.) | 0,52 (с 1987 по 2018 гг.) | 0,34 (с 2000 по 2018 гг.) |

В посвященном Азербайджану докладе Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций «Управление горными лесами и водоразделами» за 2010 г. приводятся 2 основные причины исчезновения

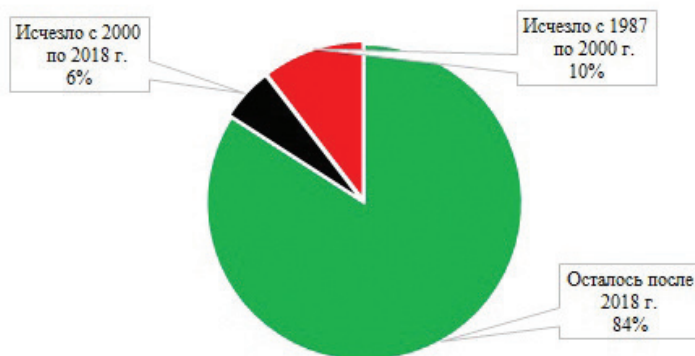
лесов – незаконная вырубка и лесные пожары. Указывается, что объемы вырубки в год составляют от 30 до 50 тыс. м³. С точки зрения пожаров наиболее бедственными стали 2004 и 2007 гг., когда выгорало в среднем по 80 га леса, в отличие от обычных 20–30 га [9].

В том же докладе отмечается, что ежегодные лесовосстановительные работы проводятся на территории в среднем 10 тыс. га, что должно принести результаты в самое ближайшее время. Опыт искусственного лесовосстановления показал, что высадка лесных культур является действенным приемом повышения продуктивности лесов [8].

По данным табл. 2 построена диаграмма (рис. 7). Как видно из нее, за последние 30 лет территория, покрытая лесом, неуклонно сокращается. Однако скорость этого процесса снижается с 0,81 % в течение 13 лет с 1987 по 2000 гг. до 0,34 % в течение последних 18 лет. Это вселяет веру в то, что положительный эффект проводимых мероприятий по сохранению лесов будет заметен в ближайшее время и что очередная карта покажет уже не исчезновение лесного покрова, а, наоборот, приращение площади лесов.

Рис. 7. Диаграмма исчезновения лесов

Fig.7. Forest loss diagram



Ниже приведены табл. 3 и рис. 8 с данными об исчезновении лесов отдельно по районам, составляющим данный регион. Как видно из таблицы, наибольшая убыль за рассматриваемый период наблюдалась в северных районах – Губинском, Хачмазском и Кусарском. В более южных районах сокращение площади лесов приостановилось и есть тенденция к восстановлению леса.

Таблица 3

Изменение площади лесного покрова для районов

| Район | Площадь лесного покрова, га | | | Исчезло с 1987 по 2018 г. | | |
|--------------|-----------------------------|---------|---------|---------------------------|-------------|------------|
| | 1987 г. | 2000 г. | 2018 г. | га | % к 1987 г. | за год, га |
| Губа | 660,1 | 605,5 | 568,7 | 91,4 | 13,8 | 2,96 |
| Хачмаз | 185,6 | 181,9 | 142,5 | 43,1 | 23,2 | 1,40 |
| Кусары | 460,6 | 363,2 | 374,4 | 86,2 | 18,7 | 2,80 |
| Шабран | 159,2 | 159,7 | 146,2 | 13,0 | 8,2 | 0,42 |
| Сиазань | 11,4 | 12,1 | 9,8 | 1,6 | 14,0 | 0,05 |
| <i>Всего</i> | 1476,9 | 1322,4 | 1241,6 | 235,3 | 15,9 | 7,63 |

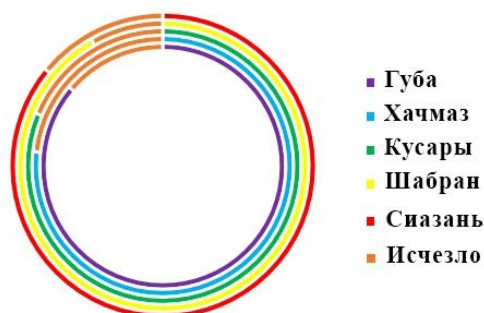


Рис. 8. Диаграмма изменения площади лесного покрова в 1987–2018 гг. по районам

Fig. 8. Chart of change in forest cover area in 1987–2018 by districts

Заклучение

На основании обработки многоспектральных спутниковых снимков, полученных за несколько лет, и расчета вегетационных индексов выделены площади, занимаемые лесными массивами в северо-восточном регионе Азербайджана. Рассчитаны размеры территорий, покрытых лесом в различные годы. Построена электронная карта, тематические слои которой отражают найденные значения.

Определены скорости продолжающегося исчезновения лесов, взятые за различные интервалы времени. Убыль лесного массива составила 16 % за последние 30 лет. Однако показано, что в последние 18 лет процесс имеет тенденцию к замедлению. Динамика отражена в таблицах, на диаграммах и электронной карте. Показано изменение площади лесного покрова как для всего региона в целом, так и отдельно для входящих в него районов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Баршшполец В.А.* Анализ глобальных экологических проблем // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2011. Т. 3, № 1. С. 79–96. Barishpolets V.A. The Analysis of Global Environmental Problems. *RENSIT*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 79–96.
2. *Болсуновский М.А., Черепанов А.С.* Атмосферная коррекция в ПО ENVI. Модуль FLAASH // Геопрофи. 2006. № 5. С. 22–24. Bolsunovskiy M.A., Cherepanov A.S. Atmospheric Correction Using ENVI Software. FLAASH Module. *Geoprofi*, 2006, no. 5, pp. 22–24.
3. *Данилова И.В., Рыжкова В.А., Корец М.А.* Алгоритм автоматизированного картографирования современного состояния и динамики лесов на основе ГИС // Вест. НГУ. Сер.: Информ. технологии. 2010. Т. 8, вып. 4. С. 15–24. Danilova I.V., Ryzhkova V.A., Korets M.A. A GIS-Aided Algorithm for Mapping the Current Forest State and Dynamics. *Vestnik NGU. Ser.: Informatsionnyye tekhnologii* [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 2010, vol. 8, iss. 4, pp. 15–24.
4. *Деркачева А.А., Тутубалина О.В.* Эффективность атмосферных коррекций гиперспектральных снимков Hyperion в регионах с развитым растительным покровом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 4. С. 360–368. Derkacheva A.A., Tutubalina O.V. The Effectiveness of Atmospheric Correction for Hyperion Hyperspectral Images in Regions with Developed Vegetation Cover. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2014, vol. 11, no. 4, pp. 360–368.
5. *Дубинин М.* NDVI – теория и практика // GIS-Lab. 2002. Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения: 03.06.20). Dubinin M. NDVI – Theory and Practice. *GIS-Lab*. 2002.
6. *Казаков Э., Семёнов А., Волгушева Н.* Обработка и интерпретация данных Landsat 8 (OLI) средствами GRASS GIS 7 // GIS-Lab. 2015. Режим доступа:

<https://gis-lab.info/qa/grass7-landsat8-processing.html> (дата обращения: 19.06.20). Kazakov E., Semenov A., Volgusheva N. Processing and Interpretation of Landsat 8 (OLI) Data by Means of GRASS GIS 7. *GIS-Lab*. 2015.

7. Лурье И.К., Косиков А.Г. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Ч. 1. Теория и практика цифровой обработки изображений. М.: Науч. мир, 2003. 166 с. Lur'ye I.K., Kosikov A.G. Remote Sensing and Geographical Information Systems. Part 1. *Theory and Practice of Digital Image Processing*. Moscow, Nauchnyu mir Publ., 2003. 166 p.

8. Мерзленко М.Д. Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 22–30. Merzlenko M.D. Relevant Aspects of Artificial Reforestation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 3, pp. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.22>

9. Управление горными лесами и водоразделами. Доклад Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций. Режим доступа: <http://www.fao.org/forestry/36963-0ac84a8f742747df79dfe116b1d72665a.pdf>. (дата обращения: 06.03.20). *Management of Mountain Forests and Watersheds*. Report of the Food and Agriculture Organization of the United Nations.

10. 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 Characteristics of Vegetation and Vegetation Indexes. *Geomatika* [Geomatics], 2009, no. 3, pp. 28–32.

11. 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.

12. ArcView GIS для экологов. Российская сеть изучения и охраны пернатых хищников. Режим доступа: <http://rrrcn.ru/arcview-gis-dlya-ekologov5/24> (дата обращения: 03.06.20). ArcView GIS for Ecologists. *Russian Raptor Research and Conservation Network*.

13. Earth Explorer. U.S. Geological Survey. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 15.07.20).

14. Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH). *L3 Harris Geospatial documentation center*. Available at: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/flaash.html> (accessed 14.07.20).

15. Hadjimitsis D.G., Papadavid G., Agapiou A., Themistocleous K., Hadjimitsis M.G., Retalis A., Michaelides S., Chrysoulakis N., Toullos L., Clayton C.R.I. Atmospheric Correction for Satellite Remotely Sensed Data Intended for Agricultural Applications: Impact on Vegetation Indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, vol. 10, iss. 1, pp. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-89-2010>

16. *Meşələr. Respublikanın meşələri* [The Forests of the Republic]. Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan Republic. Available at: <http://eco.gov.az/az/fealiyyet-istiqametleri/mesheler> (accessed 25.10.19).

17. Naik P., Dalponte M., Bruzzone L. Prediction of Forest Aboveground Biomass Using Multitemporal Multispectral Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 7, art. 1282. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13071282>

18. Teixeira Pinto C., Jing X., Leigh L. Evaluation Analysis of Landsat Level-1 and Level-2 Data Products Using *in situ* Measurements. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, iss. 16, art. 2597. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12162597>

19. Thome K.J., Biggar S.F., Gellman D.L., Slater P.N. Absolute-Radiometric Calibration of Landsat-5 Thematic Mapper and the Proposed Calibration of the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. *Proceedings of IGARSS '94 – 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Pasadena, CA, IEEE, 1994, vol. 4, pp. 2295–2297. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1994.399718>

20. Zanter K. *Landsat Collection 1 Level 1 Product Definition. Version 2.0*. Sioux Falls, SD, USGS, 2019. 32 p.

УДК 712.4(470.62)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-98-109

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВЫХ РАСТЕНИЙ В ОЗЕЛЕНЕНИИ ГОРОДА КРАСНОДАР

*Н.В. Примаков^{1,2}, канд. с.-х. наук, доц.; Researcher ID [ABD-8930-2021](#),
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>*

¹Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, Россия, 350040

²Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044; e-mail: nik-primakov@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 20.03.20 / Принята к печати 04.06.20

Аннотация. На сегодняшний день уже примерно половина населения земного шара живет в городах. Зеленые насаждения, а также состояние объектов озеленения и качество древесно-кустарниковых растений играют важную роль в формировании комфортной среды и улучшении экологических условий существования людей в городе. Цель исследований – оценка на примере г. Краснодара состояния объектов озеленения, качества древесно-кустарниковых растений, устойчивости видов деревьев к антропогенным нагрузкам. Объектами изучения стали парк «Солнечный остров», парк им. М. Горького, парк стадиона «Кубань», Чистяковская роща, Ботанический сад им. И.С. Косенко, сквер им. Г.К. Жукова, сквер Дружбы народов, сквер «Майский», сквер им. Л.Г. Гатова, Вишняковский сквер, сквер им. Ивана Кочубея, Фестивальный сквер, Новорождественский сквер. Исследования проводили в 2016–2019 гг. Описано 27 вариантов исследований, изучено 2634 дерева и кустарника, 50 их видов и форм, относящихся к 2 отделам, 21 семейству и 30 родам. Для изучения выбраны насаждения, занимающие большие площади на объектах озеленения. Осуществлена оценка состояния древесных пород Краснодара. Результаты соотнесены с результатами, полученными другими авторами. Из числа изученных видов 16 древесных пород соответствует рекомендациям Дюваль-Строева, 27 – не соответствует, по 7 породам данные отсутствовали. Проанализировав основные характеристики аборигенных и инвазивных видов древесно-кустарниковых пород, используемых в озеленении Краснодара, приходим к выводу, что основное количество интродуцентов находится в категории сильно ослабленных, а аборигенных видов – в категории ослабленных. В настоящее время условия для произрастания древесных насаждений в Краснодаре изменились: увеличилась антропогенная нагрузка. В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем проведении инвентаризации древесных пород и оценке древесно-кустарниковых растений для создания полной базы деревьев и кустарников, наиболее устойчивых к современным условиям города.

Для цитирования: Примаков Н.В. Перспективность применения древесно-кустарниковых растений в озеленении города Краснодар // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 98–109. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-98-109

Ключевые слова: озеленение, оценка деревьев, аборигенные виды, экологическое состояние, устойчивость деревьев, таксационные характеристики, интродуценты, Краснодар.

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

PROSPECTS FOR WOODY AND SHRUBBY PLANTS IN THE LANDSCAPING OF KRASNODAR

Nikolay V. Primakov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof;

ResearcherID: [ABD-8930-2021](https://orcid.org/0000-0001-9225-024X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

¹Kuban State University, ul. Stavropol'skaya, 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, ul. Kalinina, 13, Krasnodar, 350044, Russian Federation; e-mail: nik-primakov@yandex.ru

Original article / Received on March 20, 2020 / Accepted on June 4, 2020

Abstract. Nowadays, about half of the world's population lives in cities. Green spaces, as well as the condition of landscaping facilities and the quality of woody and shrubby plants play an important role in creating a comfortable environment and improving the ecological conditions for people living in the city. The research purpose is to assess the current state of landscaping objects, the quality of woody and shrubby plants and the resistance of tree species to anthropogenic loads using Krasnodar as a case study. The following parks and squares became the research objects: Solnechny Ostrov ("Sunny Island") Park, Park named after Maxim Gorky, Kuban Stadium Park, Chistyakovskaya Grove, Botanical Garden of Professor I.S. Kosenko, Marshal Zhukov's Park, Druzhba Narodov Square, Mayskiy Square, Square named after L.G. Gatov, Vishnyakovsky Square, Square named after Ivan Kochubey, Festivalny Square, and Novorozhdestvenskiy Square. The research was carried out in 2016–2019. During the research, 27 options of studies were described, 2634 trees and shrubs, their 50 species and forms related to 2 groups, 21 families and 30 genera were studied. The plantations that occupy large areas of the landscaping sites were sampled for study. An assessment of the state of woody species in Krasnodar was carried out. The results are compared with those obtained by other authors. Among the studied species, 16 woody species meet the recommendations of Dyugal'-Stroyev M.R. and 27 do not meet them; no data is available for 7 species. Having analyzed the main characteristics of native and invasive woody and shrubby species used in landscaping of Krasnodar, we come to the conclusion that the main part of introduced species belongs to the strongly weakened category, while the native species are in the weakened category. At present, the conditions for tree growth in Krasnodar have changed: anthropogenic load has increased. In this regard, there is a need for further inventory of tree species and assessment of woody and shrubby plants to create a complete database of trees and shrubs that are most resistant to the current urban conditions.

For citation: Primakov N.V. Prospects for Woody and Shrubby Plants in the Landscaping of Krasnodar. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 98–109. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-98-109

Keywords: landscaping, tree assessment, native species, ecological state, sustainability of trees, inventory characteristics, introduced species, Krasnodar.

Введение

Ввиду укрупнения городов изучение современного состояния располагающихся на их территории объектов озеленения имеет огромное значение. В настоящее время около половины жителей земли – городские жители. Так, в Краснодарском крае, по данным [7], в период с 2010 по 2018 г. наблюдается рост численности городского населения с 2769 до 3116 тыс. чел. Краснодар представляет собой крупнейшую городскую агломерацию Северокавказского региона,

в которой проживает 15 % населения Краснодарского края. При определении стратегии улучшения городской среды многие экологи на первое место ставят усиление автотрофного блока городских экосистем. Для этого рекомендуют увеличивать площадь городских зеленых насаждений [5, 17, 19, 20], значение которых в жизни человека трудно переоценить. Другие исследователи в связи с недостатком площадей озеленения в городе уделяют особое внимание состоянию деревьев. Состояние объектов озеленения и качество древесно-кустарниковых растений играют важную роль при формировании комфортной среды и улучшении экологических условий существования населения в городе [2, 8, 10, 11, 14, 16, 18].

В последние годы значительно увеличилось количество стареющих насаждений, а также больных, пораженных вредителями и болезнями деревьев. Слабым местом зеленого хозяйства Краснодара является качество ассортимента деревьев и кустарников, используемых для создания объектов озеленения: скверов, парков, уличных придорожных и внутриквартальных насаждений. Он однообразен и, за редким исключением, состоит из недолговечных, недостаточно устойчивых к местным неблагоприятным условиям древесных растений [1, 6, 9, 15].

Цель – исследование перспективности применения видов древесно-кустарниковой растительности в озеленении Краснодара, оценка их устойчивости к антропогенным нагрузкам в современных условиях.

Объекты и методы исследования

В Краснодаре насчитывается более ста объектов озеленения. Это лесопарки, парки, ботанические сады, скверы, бульвары, аллеи и др. Исследования проводили в 2016–2019 гг. Описано 27 вариантов исследований, изучено 2634 дерева и кустарника. Наблюдениями охвачены такие объекты, как парк «Солнечный остров», парк им. М. Горького, парк стадиона «Кубань», Чистяковская роща, Ботанический сад им. И.С. Косенко, сквер им. Г.К. Жукова, сквер Дружбы народов, сквер «Майский», сквер им. Л.Г. Гатова, Вишняковский сквер, сквер им. Ивана Кочубея, Фестивальный сквер, Новорождественский сквер. Расположение объектов исследований в Краснодаре представлено на рис. 1.

Исследования проводили по общепринятым методикам и рекомендациям. Для закладки пробных площадей (ПП) использовали рекомендации [12]. Выбирали насаждения, занимающие большие площади на объектах озеленения, и составляли таблицы по каждому из них. Фиксировали следующие таксационные характеристики: происхождение, высоту, диаметр, бонитет, экологическое состояние (по санитарному состоянию деревьев) и др. Количество ПП соответствует количеству вариантов исследований, т. е. 27. Число деревьев и размеры ПП неодинаковы.

В каждом варианте проводили сплошной пересчет деревьев и кустарников. Определяли их количество, преобладающие породы, устанавливали состав насаждений. Санитарное состояние оценивали по шкале Санитарных правил в лесах Российской Федерации [13]: 1-я категория – деревья без признаков ослабления; 2-я – ослабленные в результате засух, пожаров, фито- и энтомофитовредителей (в кроне отмечаются отдельные сухие ветви); 3-я – сильно ослабленные (сухих ветвей до 50 %); 4-я – усыхающие (сухих ветвей более 50 %, деревья часто суховершиняты); 5-я – сухостой текущего года; 6-я – сухостой прошлых лет.

Детальное изучение всех древесно-кустарниковых пород на каждой из ПП проводили, объединяя древесно-кустарниковые породы по видам.

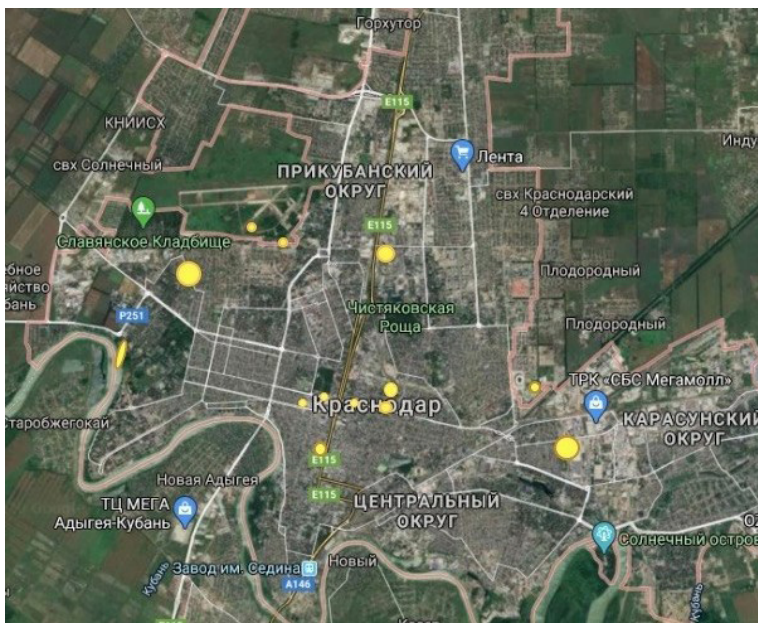


Рис. 1. Расположение объектов исследований в Краснодаре. Размер желтых точек показывает различие между крупными объектами (парками) и более мелкими (скверами)

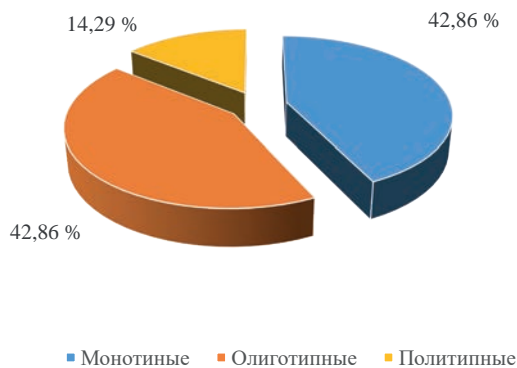
Fig. 1. Location of the research sites in Krasnodar. The size of the yellow dots shows the difference between larger sites (parks) and smaller sites (squares)

Результаты исследования и их обсуждение

За период исследований изучено 50 видов и форм деревьев и кустарников, относящихся к 2 отделам, 21 семейству и 30 родам. Таксономический анализ по типу семейств представлен на рис. 2. Политипные семейства составляют всего 14,29 %, в то время как олиготипные и монотипные – 42,86 %. Отдел *Pinophyta* включает 4 семейства, 8 родов и 12 видов, *Magnoliophyta* – 17 семейств, 23 рода и 39 видов. Крупнейшими семействами являются *Pinaceae*, *Aceraceae*, *Fagaceae*, *Salicaceae*, *Ulmaceae*, составляющие 46 % от общего числа пород.

Рис. 2. Распределение изученных деревьев и кустарников по типам семейств

Fig. 2. Distribution of the studied trees and shrubs by family types



Наиболее часто в насаждениях парков и скверов встречаются следующие древесные породы: *Betula pendula* Roth., *Tilia cordata* Mill., *Juglans nigra* L., *Pinus sylvestris* L., *Quercus rubra* L., *Pinus pallasiana* Lamb., *Acer platanoides* L., *Aesculus hippocastanum* L., *Fraxinus pensylvanica* March., *Gleditshia triacanthos* L., *Acer pseudoplatanus* L. Остальные породы составляют менее 3 % от всех исследованных деревьев и кустарников. Соотношение преобладающих древесных пород отражено на рис. 3.

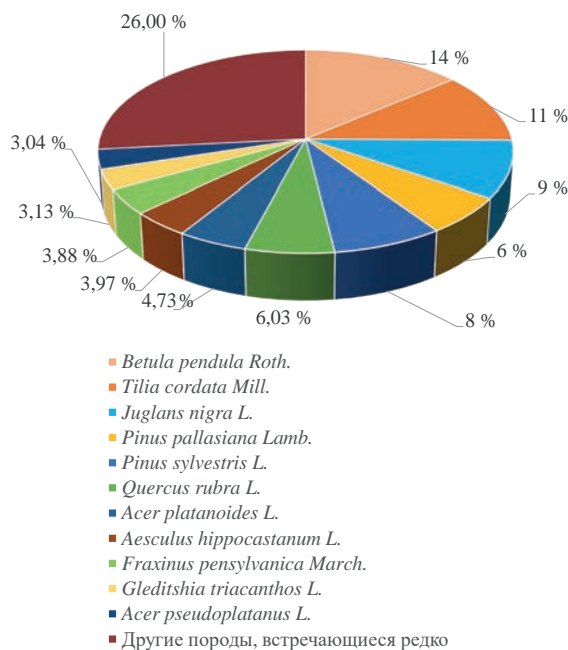


Рис. 3. Соотношение преобладающих древесных пород в парках и скверах Краснодара

Fig. 3. The ratio of the predominant tree species in Krasnodar's parks and squares

Большинство исследованных растений имели семенное происхождение (99,69 %), и только 0,31 % – порослевое.

Наиболее распространены деревья 2 и 3-й категорий, составившие 42,65 и 44,92 % соответственно от общего количества деревьев. Категория 4 занимает 6,68 %, 1 – 2,85 %, 5 и 6 – 1,87 и 1,02 % соответственно. Процентное соотношение категорий экологического состояния представлено на рис. 4. Таким образом, большинство исследованных деревьев – ослабленные и сильно ослабленные.

Для оценки изучаемых древесно-кустарниковых пород был выполнен сравнительный анализ по рекомендациям Дюваль-Строева, проводившего исследования в 1960-х гг. (табл. 1) [3, 4].

Из 50 изученных пород 26 было рекомендовано Дюваль-Строевым, 17 – не рекомендовано, а по 7 породам данные отсутствовали. В настоящее время в озеленении города наиболее активно используются виды, рекомендованные Дюваль-Строевым в 1963 г., а доля нерекондованных заметно снизилась. Однако некоторые древесно-кустарниковые породы, не рекомендованные Дюваль-Строевым, и сегодня распространены в посадках объектов озеленения. К таким породам относятся: *Gleditshia triacanthos* L., *Robinia pseudoacacia* L. и *Fraxinus pensylvanica* March.

Рис. 4. Соотношение категорий экологического состояния деревьев и кустарников в парках и скверах Краснодара

Fig. 4. The ratio of ecological state categories of trees and shrubs in parks and squares of Krasnodar

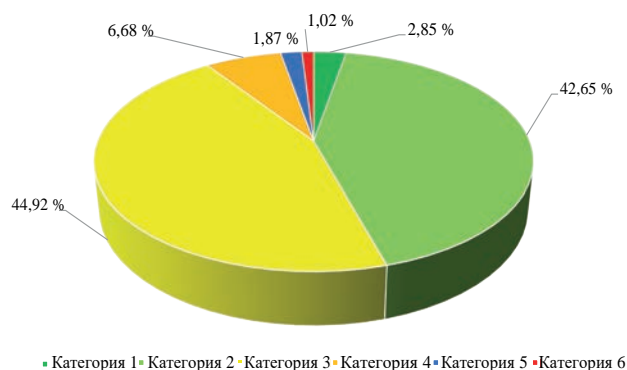


Таблица 1

Древесно-кустарниковые породы для озеленения в г. Краснодаре (по данным Дюваль-Строева), их средняя экологическая оценка (по современным данным)

| Порода | Рекомендации по использованию для Краснодара | Экологическая оценка (категория) | Соответствие рекомендациям |
|--|--|----------------------------------|----------------------------|
| <i>Juniperus sabina</i> L. | Нет данных | 1 | Нет данных |
| <i>J. virginiana</i> L. | Рекомендовано | 2 | + |
| <i>Thuja occidentalis</i> L. | Нет данных | 2 | Нет данных |
| <i>T. orientalis</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>Ginkgo biloba</i> L. | Рекомендовано | 2 | + |
| <i>Abies nordmanniana</i> (Stev.) Spach. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>Picea pungens</i> Engelm. f. <i>glauca</i> | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>P. pungens</i> f. <i>viridis</i> Red. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>Pinus pallasiana</i> Lamb. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>P. sylvestris</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>Taxus baccata</i> L. | Рекомендовано | 1 | + |
| <i>Acer campestre</i> L. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>A. negundo</i> L. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>A. platanoides</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>A. pseudoplatanus</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>A. saccharinum</i> L. | Рекомендовано | 2 | + |
| <i>Rhus typhina</i> L. | Нет данных | 2 | Нет данных |
| <i>Betula pendula</i> Roth. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>Carpinus betulus</i> L. | Нет данных | 3 | Нет данных |
| <i>Catalpa bignonioides</i> Walt. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>Gleditsia triacanthos</i> L. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>Robinia pseudoacacia</i> L. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>Castanea sativa</i> Mill. | Нет данных | 2 | Нет данных |
| <i>Quercus hartwissiana</i> Steven. | Рекомендовано | 2 | + |
| <i>Q. robur</i> L. | Рекомендовано | 2 | + |
| <i>Q. robur</i> f. <i>fastigiata</i> (Lam.) A.D.C. | Рекомендовано | 3 | – |

Окончание табл. 1

| Порода | Рекомендации по использованию для Краснодара | Экологическая оценка (категория) | Соответствие рекомендациям |
|--|--|----------------------------------|----------------------------|
| <i>Q. rubra</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>Aesculus hippocastanum</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>Juglans nigra</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>J. regia</i> L. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>Hibiscus syriacus</i> L. | Рекомендовано | 2 | + |
| <i>Morus alba</i> L. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>Fraxinus excelsior</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>F. pennsylvanica</i> March. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>Syringa vulgaris</i> L. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>Platanus acerifolia</i> Willd. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>P. occidentalis</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>P. orientalis</i> L. | Нет данных | 2 | Нет данных |
| <i>Prunus cerasifera</i> Ehrh. | Нет данных | 3 | Нет данных |
| <i>Populus alba</i> L. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>P. simonii</i> Carr. | Рекомендовано | 2 | + |
| <i>P. pyramidalis</i> Rosier. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>Salix babylonica</i> L. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>Ailanthus altissima</i> (Mill) Swingle. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>Tilia cordata</i> Mill. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>T. platyphyllos</i> Scop. | Не рекомендовано | 2 | – |
| <i>Celtis occidentalis</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>Ulmus glabra</i> Huds. | Рекомендовано | 3 | – |
| <i>U. laevis</i> Pall. | Не рекомендовано | 3 | + |
| <i>U. pumila</i> L. | Рекомендовано | 3 | – |

Примечание: + показано соответствие рекомендациям; – обозначает несоответствие.

Среди изученных видов 16 древесно-кустарниковых пород соответствует рекомендациям Дюваль-Строева, 27 – не соответствует, по 7 породам данные отсутствуют. В 1963 г. Дюваль-Строев рекомендовал виды исходя из их зимостойкости, засухоустойчивости, цветения и плодоношения. В настоящее время условия для произрастания древесных насаждений изменились, увеличилась антропогенная нагрузка. В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем проведении инвентаризации древесных пород и оценке древесно-кустарниковых растений для создания полной базы данных деревьев и кустарников, наиболее устойчивых к современным условиям Краснодара.

Из 50 исследованных видов древесно-кустарниковых пород 52 % составляют инвазивные виды, а 48 % – аборигенные виды, что наглядно показано на рис. 5.

Среди древесно-кустарниковых интродуцентов преобладают североамериканские виды (50 %), к азиатскому региону относится 38,46 %, к европейскому – 11,54 %.

Некоторые характеристики инвазивных видов древесно-кустарниковых пород, используемых в озеленении Краснодара, представлены в табл. 2.

Рис. 5. Доля аборигенных и инвазивных видов древесно-кустарниковых пород в вариантах опыта



Fig. 5. The share of native and invasive tree and shrub species in the experiments

Таблица 2

Некоторые характеристики инвазивных видов древесно-кустарниковых пород, используемых в озеленении г. Краснодара

| Порода | Среднее значение | | | |
|---|------------------|---------------|---------|----------------------------------|
| | <i>h</i> , м | <i>d</i> , см | бонитет | экологическая оценка (категория) |
| <i>Juniperus virginiana</i> L. | 4,2 | 7,7 | III | 2,2 |
| <i>Thuja occidentalis</i> L. | 5,5 | 7,2 | II | 2,1 |
| <i>T. orientalis</i> L. | 6,9 | 16,7 | III | 2,9 |
| <i>Ginkgo biloba</i> L. | 8,3 | 11,2 | II | 2,1 |
| <i>Picea pungens</i> Engelm. f. <i>glauca</i> | 9,6 | 21,9 | III | 2,5 |
| <i>P. pungens</i> f. <i>viridis</i> Red. | 10,7 | 22,5 | III | 2,5 |
| <i>Acer negundo</i> L. | 13,1 | 42,6 | IV | 3,3 |
| <i>Rhus typhina</i> L. | 5,6 | 7,5 | III | 2,0 |
| <i>Catalpa bignonioides</i> Walt. | 7,1 | 17,5 | III | 2,3 |
| <i>Gleditshia triacanthos</i> L. | 12,5 | 36,4 | III | 2,2 |
| <i>Robinia pseudoacacia</i> L. | 15,5 | 43,4 | IV | 2,9 |
| <i>Quercus rubra</i> L. | 18,1 | 36,5 | III | 2,6 |
| <i>Aesculus hippocastanum</i> L. | 13,9 | 42,3 | IV | 2,9 |
| <i>Juglans nigra</i> L. | 18,7 | 51,7 | III | 2,6 |
| <i>J. regia</i> L. | 10,7 | 22,4 | III | 2,8 |
| <i>Hibiscus syriacus</i> L. | 4,9 | 10,5 | II | 2,0 |
| <i>Morus alba</i> L. | 10,6 | 30,0 | III | 2,8 |
| <i>Fraxinus pensylvanica</i> March. | 14,2 | 39,3 | III | 2,6 |
| <i>Syringa vulgaris</i> L. | 4,0 | 9,5 | III | 2,0 |
| <i>Platanus acerifolia</i> Willd. | 14,6 | 47,9 | III | 2,6 |
| <i>P. occidentalis</i> L. | 14,4 | 33,1 | III | 2,5 |
| <i>Populus simonii</i> Carr. | 15,1 | 28,8 | III | 2,4 |
| <i>P. pyramidalis</i> Rosier. | 22,2 | 112,0 | III | 3,0 |
| <i>Salix babylonica</i> L. | 3,0 | 2,5 | II | 2,0 |
| <i>Ailanthus altissima</i> (Mill) Swingle. | 15,3 | 57,0 | III | 2,2 |
| <i>Ulmus pumila</i> L. | 13,5 | 44,3 | III | 2,8 |

Примечание: *h* – высота; *d* – диаметр. Экологическая оценка: посредством измерения всех инвазивных древесно-кустарниковых растений и вычисления с округлением до десятых средних значений определена категория.

Из всех изученных интродуцентов 14,38 % относится ко II классу бонитета, 73,08 % – к III и 11,54 % – к IV. В соответствии со средней экологической оценкой, 42,31 % инвазивных древесных пород принадлежат ко 2-й категории состояния, а 57,69 % – к 3-й. Таким образом, анализ основных показателей позволяет выделить виды, наиболее устойчивые к условиям городской среды: *Thuja occidentalis* L., *Ginkgo biloba* L., *Hibiscus syriacus* L., *Juniperus virginiana* L., *Ailanthus altissima* (Mill) Swingle. и *Gleditsia triacanthos* L. Более низким состоянием обладает древесная порода *Acer negundo* L., которая в свою очередь была не рекомендована Дюваль-Строевым.

Характеристики аборигенных видов древесно-кустарниковых пород, применяемых в Краснодаре, приведены в табл. 3. Большинство аборигенных видов имеет III класс бонитета – 62,5 %, II класс – 16,67 %, IV – 20,83 %.

Таблица 3

Некоторые характеристики аборигенных видов древесно-кустарниковых пород, используемых в озеленении г. Краснодара

| Порода | Среднее значение | | | |
|--|------------------|---------------|---------|----------------------------------|
| | <i>h</i> , м | <i>d</i> , см | бонитет | экологическая оценка (категория) |
| <i>Juniperus sabina</i> L. | 0,4 | 0,3 | II | 1,0 |
| <i>Abies nordmanniana</i> (Stev.) Spach. | 16,2 | 45,5 | III | 2,0 |
| <i>Pinus pallasiana</i> Lamb. | 16,8 | 29,8 | IV | 3,2 |
| <i>P. sylvestris</i> L. | 11,7 | 31,3 | III | 2,9 |
| <i>Taxus baccata</i> L. | 2,1 | 1,8 | II | 1,1 |
| <i>Acer campestre</i> L. | 10,2 | 20,3 | IV | 3,3 |
| <i>A. platanoides</i> L. | 10,7 | 22,2 | III | 2,5 |
| <i>A. pseudoplatanus</i> L. | 12,4 | 31,6 | IV | 2,8 |
| <i>A. saccharinum</i> L. | 4,3 | 5,0 | II | 2,0 |
| <i>Betula pendula</i> Roth. | 14,8 | 34,7 | III | 2,7 |
| <i>Carpinus betulus</i> L. | 4,5 | 11,0 | IV | 3,0 |
| <i>Castanea sativa</i> Mill. | 6,6 | 11,3 | III | 2,0 |
| <i>Quercus hartwissiana</i> Steven. | 19,9 | 46,6 | II | 1,8 |
| <i>Q. robur</i> L. | 17,7 | 48,4 | III | 2,1 |
| <i>Q. robur</i> f. <i>fastigiata</i> (Lam.) A.D.C. | 18,1 | 50,6 | III | 2,6 |
| <i>Fraxinus excelsior</i> L. | 12,9 | 24,0 | III | 3,0 |
| <i>Platanus orientalis</i> L. | 17,3 | 44,2 | III | 2,3 |
| <i>Prunus cerasifera</i> Ehrh. | 7,2 | 15,2 | III | 2,5 |
| <i>Populus alba</i> L. | 15,7 | 35,3 | III | 2,3 |
| <i>Tilia cordata</i> Mill. | 13,0 | 33,9 | III | 2,4 |
| <i>T. platyphyllos</i> Scop. | 15,2 | 41,1 | III | 2,4 |
| <i>Celtis occidentalis</i> L. | 15,3 | 51,9 | III | 2,9 |
| <i>Ulmus glabra</i> Huds. | 15,0 | 58,0 | III | 3,0 |
| <i>U. laevis</i> Pall. | 14,6 | 54,0 | IV | 3,3 |

Категория 3 составляет 54,17 %, на категорию 2 приходится 37,5 %, на 1-ю – всего 8,33 %. Древесными породами в хорошем состоянии считаются *Juniperus sabina* L., *Taxus baccata* L., *Quercus hartwissiana* Steven., *Q. robur* L., *Castanea sativa* Mill. и *Acer saccharinum* L. Более низкую оценку получили *Ulmus laevis* Pall., *Pinus pallasiana* Lamb. и *Acer campestre* L.

Заключение

В настоящее время численность населения крупных городов выросла, выросла и антропогенная нагрузка на городские древесные насаждения, в т. ч. на насаждения Краснодара. В связи с этим необходимо проведение инвентаризации древесных пород, оценки древесно-кустарниковых растений с целью создания полной базы данных деревьев и кустарников, наиболее устойчивых к современным условиям Краснодара. Среди изученных видов 16 древесных пород соответствует рекомендациям Дюваль-Строева, 27 – не соответствует, по 7 породам данные отсутствуют.

Анализ основных характеристик аборигенных и инвазивных видов древесно-кустарниковых пород, применяемых в озеленении Краснодара, показал, что большая часть интродуцентов относится к категории сильно ослабленных, а аборигенных видов – к категории ослабленных. Средняя экологическая оценка инвазивных древесных пород выявила виды, наиболее устойчивые к условиям городской среды: *Thuja occidentalis* L., *Ginkgo biloba* L., *Hibiscus syriacus* L., *Juniperus virginiana* L., *Ailanthus altissima* (Mill) Swingle. и *Gleditsia triacanthos* L. Более низким состоянием обладает порода *Acer negundo* L. Большинство аборигенных видов сильно ослабленные – 54,17 %, на категорию ослабленных приходится 37,5 %, не обнаружены признаки ослабления всего у 8,33 %. Древесные породы с хорошим состоянием – *Juniperus sabina* L., *Taxus baccata* L., *Quercus hartwissiana* Steven., *Q. robur* L., *Castanea sativa* Mill. и *Acer saccharinum* L.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Большова О.Г., Бухарина И.Л. Состояние и пути оптимизации озеленения малых городов Липецкой области // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. № 2(16). С. 79–85. Bolyshova O.G., Bukharina I.L. Condition and Ways of Optimization of Planting of Greenery (on the Example of Little Towns in the Lipetsk Region). *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2012, no. 2(16), pp. 79–85.
2. Гонтарь О.Б., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н., Жиров В.К. Этапы создания и анализ особенностей ассортимента декоративных древесных растений для оптимального озеленения урбанизированных территорий Кольского Севера // Вестн. МГТУ. 2011. Т. 14, № 3. С. 577–582. Gontar O.B., Svyatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N., Zhiron V.K. Stages of Development and Analysis of Assortment of Ornamental Arboreal Plants for Urbanized Territories of the Kola North. *Vestnik MGTU* [Vestnik of MSTU], 2011, vol. 14, no. 3, pp. 577–582.
3. Дюваль-Строев М.Р. Результаты акклиматизации деревьев и кустарников в г. Краснодаре // Бюл. ГБС АН СССР. 1963. Вып. 49. С. 15–22. Dyuvval'-Stroyev M.R.

Results of Acclimatisation of Trees and Shrubs in Krasnodar. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada AN SSSR* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1963, iss. 49, pp. 15–22.

4. Дюваль-Строев М.Р. Озеленение населенных мест. Краснодар: Кн. изд-во, 1969. 135 с. Dyuval'-Stroyev M.R. *Greening of Inhabited Areas*. Krasnodar, Knizhnoye izdatel'stvo, 1969. 135 p.

5. Жигалов О.С., Прохорова И.А. Мировые практики в сфере благоустройства и озеленения территорий и опыт по благоустройству и озеленению г. Москвы // Материалы Ивановских чтений. 2017. № 1-1(10). С. 119–125. Zhigalov O.S., Prohorova I.A. World Practices in Landscaping and Gardening of Territories and Experience in Landscaping and Gardening of Moscow. *Materialy Ivanovskikh chteniy*, 2017, no. 1-1(10), pp. 119–125.

6. Костюков С.М. Биоэкологическое обоснование ассортимента кустарников для озеленения урбандошадфов Нижнего Поволжья: дис. ... канд. с.-х. наук. Волгоград, 2012. 171 с. Kostyukov S.M. *Bioecological Substantiation of Shrub Assortment for Improving Urban Landscapes of the Lower Volga Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Volgograd, 2012. 171 p.

7. Краснодарский край в цифрах. 2018: стат. сб. / Краснодарстат – Краснодар, 2019. 302 с. *Krasnodar Krai in Figures. 2018: Statistics Digest*. Krasnodar, Krasnodarstat Publ., 2019. 302 p.

8. Кулик К.Н., Семенютина А.В., Белицкая М.Н., Подковыров И.Ю. Современные проблемы и перспективы функционирования адаптивной системы озеленения // Изв. Нижневолжск. агроунив. комплекса: наука и высшее проф. образование. 2013. № 3(31). С. 24–29. Kulik K.N., Semenyutina A.V., Belitskaya M.N., Podkovyrov I.Yu. Modern Issues and Prospects of Adaptive Greening System Functioning. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye* [Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], 2013, no. 3(31), pp. 24–29.

9. Мичеев С.Л. Патология древесных пород, используемых для озеленения в Санкт-Петербурге и его окрестностях: дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2001. 105 с. Micheyev S.L. *Pathology of Wood Species Used for Landscaping in Saint Petersburg and Its Suburbs*: Cand. Biol. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2001. 105 p.

10. Ольхин Ю.В., Морозова И.В., Морозова К.В. Состояние насаждений парков в системе озеленения города Петрозаводска // Науч. журн. КубГАУ. 2013. № 87(03). С. 55–65. Olkhin Yu.V., Morozova I.V., Morozova K.V. Evaluation of Park Planting in the System of Gardening of Petrozavodsk. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2013, no. 87(03), pp. 55–65.

11. Потанова Е.В. Проблема озеленения г. Иркутска // Изв. ИГУ. Сер.: Науки о Земле. 2013. Т. 6, № 1. С. 161–173. Potanova E.V. Vegetation Problems in Irkutsk. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2013, vol. 6, no. 1, pp. 161–173.

12. Примаков Н.В., Гвоздецкая С.В. Методика проведения учебных практик в лесных фитоценозах // Теория и методика проведения практик по географическим дисциплинам: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Краснодар: КубГУ, 2017. С. 17–21. Primakov N.V., Gvozdetskaya S.V. The Procedure of Carrying Out Educational Practices in Forest Phytocenoses. *Theory and Procedure of Carrying out Practices on Geographical Studies: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnodar, KubSU Publ., 2017, pp. 17–21.

13. Санитарные правила в лесах Российской Федерации: утв. Федер. службой лесн. хоз-ва России 15.01.98. М.: ВНИИЦлесресурс, 1998. 25 с. *Sanitary Rules in the*

Forests of the Russian Federation: Approved by the Federal Forestry Agency Dated January 15, 1998. Moscow, VNIITslesresurs Publ., 1998. 25 p.

14. Толстикова Т.Н., Еднич Е.М., Куашева Д.А. Древесные растения Майкопа: инвентаризация, анализ, оценка перспективности использования в озеленении // Вестн. АГУ. Сер. 4: Естеств.-мат. и техн. науки. 2013. № 1(116). С. 33–39. Tolstikova T.N., Ednich E.M., Kuasheva D.A. Woody Plants of Maikop: Inventory, Analysis and Assessment of Prospects of Their Use in Gardening. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta, seriya «Estestvenno-matematicheskiye i tekhnicheskkiye nauki»* [The Bulletin of the Adyghe State University, the series “Natural-Mathematical and Technical Sciences”], 2013, no. 1(116), pp. 33–39.

15. Dadea C., Russo A., Tagliavini M., Mimmo T., Zerbe S. Tree Species as Tools for Biomonitoring and Phytoremediation in Urban Environments: A Review with Special Regard to Heavy Metals. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2017, vol. 43, iss. 4, pp. 155–167. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2017.014>

16. Dover J.W. Introduction to Urban Sustainability Issues: Urban Ecosystem. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Ed. by G. Pérez, K. Perini. Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 3–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00001-X>

17. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forest*. Ed. by M.M. Carreiro, Y.-C. Song, J. Wu. New York, Springer, 2008. 467 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-71425-7>

18. Ghafari S., Kaviani B., Sedaghatoor Sh., Allahyari M.S. Ecological Potentials of Trees, Shrubs and Hedge Species for Urban Green Spaces by Multi Criteria Decision Making. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, vol. 55, art. 126824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126824>

19. Graedel T.E., Allenby B.R. *Industrial Ecology and Sustainable Engineering*. Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2010. 352 p.

20. Tóth A., Halajová D., Halaj P. Green Infrastructure: A Strategic Tool for Climate Change Mitigation in Urban Environments. *Journal of International Scientific Publications: Ecology Safety*, 2015, vol. 9, pp. 132–138.



УДК 630.376:629.733.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-110-127

АЭРОСТАТИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ЛЕСОЗАГОТОВОК В ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНАХ

А.В. Абузов, д-р техн. наук, проф.; Researcher ID: [AAK-3854-2021](https://orcid.org/0000-0003-1082-9392),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

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

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

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136,
г. Хабаровск, Россия, 680042; e-mail: ac-systems@mail.ru, 000340@pnu.edu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 10.12.20 / Принята к печати 16.02.21

Аннотация. Проанализирована ситуация, сложившаяся на большинстве лесозаготовительных предприятий дальневосточного региона: истощение легкодоступных лесных территорий, которые возможно осваивать традиционными способами заготовки с использованием наземных комплексных систем. В последние годы область лесозаготовок смещается в лесные массивы, которые имеют признаки труднодоступности и экологической зависимости и, как правило, окружены горными склонами с резким перепадом высот. Такие характеристики лесного фонда отрицательно влияют на себестоимость лесозаготовительных работ. В этой связи возникает необходимость поиска новых способов заготовки и транспортировки древесины, позволяющих повысить не только рентабельность выполняемых работ, но и их экологическую и технологическую составляющие. Проанализированы исследования отечественных и зарубежных авторов в области изучения возможностей использования различных транспортных средств для доставки древесины от мест ее заготовки на труднодоступных лесных территориях до пунктов реализации. Сделан вывод, что единственной альтернативой автомобильному транспорту, используемому в настоящее время, могут быть только воздушные транспортные средства на основе аэростатической подъемной силы (дирижабли гибридного типа). Показаны результаты теоретических исследований по разработке методики поиска наиболее эффективной модели дирижабля среди всех существующих конструкций, функционирующих в конкретных природно-климатических условиях, и сравнения ее с другими видами транспортных средств для труднодоступной местности. Предлагается метод многокритериального структурно-параметрического синтеза на основе принципов оптимального управления с разработкой комплексной целевой функции. Чтобы оценить эффективность и возможность применения конкретных моделей аэростатических летательных аппаратов в труднодоступных лесных массивах предлагается оригинальная методика, базирующаяся на возможностях математических систем и способов управления базами данных. Проведенные исследования актуальны для организаций, имеющих потребность доставки лесной продукции, заготовленной на труднодоступных лесных территориях, воздушным транспортом.

Для цитирования: Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатические аппараты для лесозаготовок в труднодоступных районах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 110–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-110-127

Ключевые слова: труднодоступные лесные территории, воздушные транспортные средства, дирижабль, компромиссное решение, целевая функция, алгоритм, компьютерная программа, заготовка древесины.

AEROSTATIC AIRCRAFT FOR LOGGING IN REMOTE FOREST AREAS

Aleksandr V. Abuzov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAK-3854-2021](https://orcid.org/0000-0003-1082-9392),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

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

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

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru, 000340@pnu.edu.ru

Original article / Received on December 10, 2020 / Accepted on February 16, 2021

Abstract. The article analyzes the situation of the majority of logging enterprises in the Far Eastern region associated with the depletion of easily accessible forest areas, which can be developed by traditional logging methods using ground-based integrated systems. Recently, the sphere of logging has shifted to woodlands that show signs of remoteness and ecological dependency and are usually surrounded by mountain slopes with sharp differences in elevation. Such forest fund characteristics negatively affect the cost of logging operations. The authors note that in this regard, there is a need to search for new alternative methods of timber logging and transportation that not only improve the profitability of the work being done, but also its environmental and technological sides. The paper analyzes the studies of local and foreign authors in the field of studying the possibilities of using various vehicles for delivering timber from logging sites in remote forest areas to the distribution points. It is concluded that the only alternative to the currently used road transport is aerial vehicles based on aerostatic lift (hybrid type airships). The article shows the results of theoretical studies on the development of a methodology for finding the most effective model of an airship from the entire range of existing structures operating in specific natural and climatic conditions and comparing it with other types of vehicles for remote forest areas. A method for multi-criteria structural and parametric synthesis based on optimal control principles with the development of a complex target function is proposed. An original technique based on the capabilities of mathematical systems and methods of database management is proposed in order to assess the effectiveness and the possibility of using specific models of aerostatic aircraft in remote forests. The conducted studies are relevant for organizations that need to use air transport to deliver forest products harvested in remote forest areas to consumers.

For citation: Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Aerostatic Aircraft for Logging in Remote Forest Areas. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 110–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-110-127

Keywords: remote forest areas, aerial vehicles, airship, compromise solution, target function, algorithm, computer program, timber logging.

Введение

Для ряда лесных регионов России, в частности для Дальневосточного федерального округа (ДФО), лесная промышленность является одной из основных составляющих экономического развития. Однако вследствие интенсивной заготовки древесины, продолжающейся на протяжении многих лет, у большинства лесозаготовительных предприятий дальневосточного региона возникла проблема, связанная с истощением легкодоступных лесных территорий, которые возможно осваивать традиционными способами заготовки с использованием наземных комплексных систем без значительных капиталовложений в строительство транспортной инфраструктуры.

Область распространения лесозаготовительных операций в ДФО планомерно смещается из наиболее доступных территорий на лесосеки с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости: с плотно расположенными на них реками, озерами и болотами, как правило, в окружении горных склонов с резким перепадом высот. Уже сейчас остро встает вопрос о дефицитном состоянии лесного фонда ДФО ввиду его неспособности в ближайшем будущем обеспечить отрасль качественной и рентабельно доступной древесиной [2, 23, 29, 32].

По результатам исследований, доступный для нормальной эксплуатации лесосечный фонд в ДФО занимает не более 40 % лесопокрытых земель, при этом необходимо учитывать, что его освоение требует строительства и содержания лесовозных дорог. Труднодоступные лесные территории, которые представлены горными лесными массивами, лесисто-болотистыми участками, лесными участками с сильно развитой гидрологической сетью, в целом по дальневосточному региону составляют около 20 % [3].

Разработка данных участков только с помощью наземных технологий, как показывает опыт многих лесозаготовительных предприятий, является не всегда эффективной, а зачастую невозможной из-за высоких финансовых, временных и трудовых затрат, которые делают лесозаготовительный процесс на данных территориях нерентабельным.

В этой связи возникает необходимость поиска альтернативных способов заготовки и транспортировки древесины, позволяющих повысить не только рентабельность выполняемых работ, но и их экологичность и технологичность.

Цель исследований – поиск наиболее эффективной модели дирижабля во всей гамме существующих конструкций, работоспособных в конкретных природно-климатических условиях функционирования лесопромышленных предприятий ДФО (температурный режим, рельеф местности, скорость и направление ветра и т. д.).

Объекты и методы исследования

Транспортная составляющая лесозаготовительных операций является одним из основных факторов, который сдерживает увеличение объемов использования расчетной лесосеки, а точнее часто делает данные операции экономически нецелесообразными. Особенно это проявляется в условиях горной местности, где присутствует сложная мозаичность рельефа при наличии участков с резким перепадом высот и обширной гидрологической сетью.

Такая ситуация приводит к дополнительным переместительным операциям в процессе освоения лесного фонда, при этом эффективность и рентабельность лесопромышленного производства резко падают [33, 34].

По нормам проектирования дорог на территории лесосечного фонда плотность транспортной сети должна составлять не менее 1 км дороги на 8–10 тыс. м³ заготовленной древесины или 0,5–1,0 км/км². В настоящее время до 85 % всех проложенных в последние годы лесных дорог по категории «усы-ветки» строятся со значительными технологическими нарушениями и через год эксплуатации становятся непригодными для дальнейшего использования. Кроме того, большинство лесных дорог после того, как эксплуатационный лес на данной территории выбран, остаются заброшенными и невостребованными [34].

На рис. 1 представлено процентное соотношение протяженности составных частей дорожной сети и их загрузки по времени. Исследования, проведенные в Тихоокеанском государственном университете [2], показывают, что при годовой расчетной лесосеке в 11 млн м³ в год необходимо строить до 1120 км автодорог круглогодичного действия. Эта потребность оценивается ориентировочно в сумму от 3,5 до 5,5 млрд р. в зависимости от рельефных условий и гидрологии.

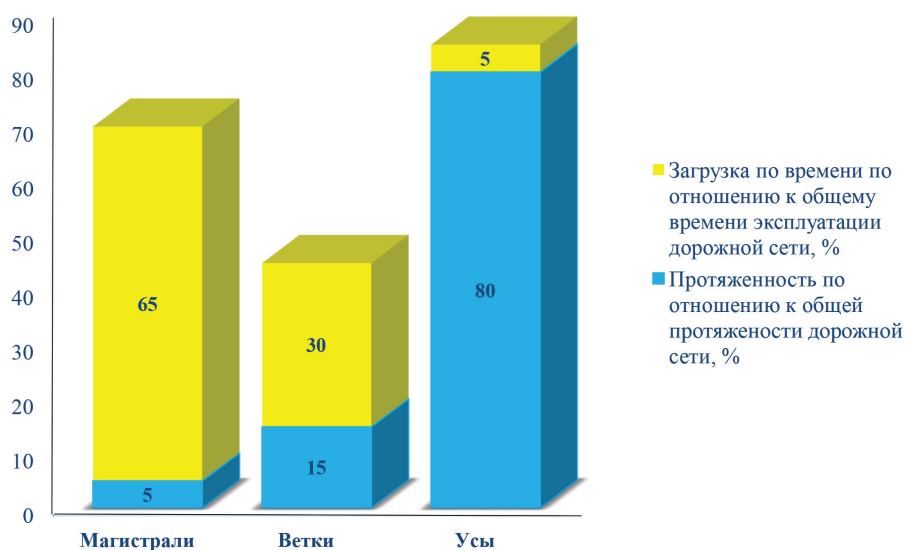


Рис. 1. Соотношение протяженности составных частей дорожной сети и загрузки по времени

Fig. 1. The ratio of the length of the road network constituents and the load over time

При существующих тарифах выполнения работ всего цикла лесопромышленного производства на лесозаготовительных предприятиях с годовым объемом более 300 тыс. м³ затраты на транспортировку заготовленной древесины достигают 48 % от общей себестоимости продукции в виде круглых лесоматериалов, а капитальные вложения в строительство и содержание лесных дорог, приобретение (и обслуживание) автомобильного подвижного состава на весь период освоения сырьевой базы – 75 %. Значительные площади спелого древостоя в ДФО находятся не только на территориях с наличием резко пересеченного рельефа и крутых склонов, но и в местах с сильно

переувлажненными грунтами, заболоченностью и топиями [1, 13]. Особенностью данных территорий является то, что основные площади, где произрастает качественный древостой, сосредоточены на крутых склонах, нижняя часть которых часто соприкасается с гидрологическими системами, такими как болота и реки. Этот фактор также отрицательно влияет на себестоимость лесозаготовительных работ. Из-за смещения сроков освоения лесного фонда (в связи с сезонной транспортной недоступностью отдельных участков) увеличиваются экономические риски предприятия, приводящие к срыву контрактов, сокращению работников и банкротству.

Для снижения экономической, технологической и экологической нагрузок на лесопромышленный комплекс необходимы не только улучшение эксплуатационных характеристик лесовозных дорог и снижение стоимости строительства 1 км подъездных путей, но и внедрение в лесозаготовительный цикл новых специализированных транспортных средств.

Реализация работ по транспортному освоению лесных территорий предполагает наличие первоначальной информации о:

- доступности территории относительно транспортного расстояния;
- географических, гидрологических и лесохозяйственных условиях;
- наличия видов и подвидов транспортных коридоров;
- наличия основных действующих пунктов перегрузки и складирования древесного сырья (железные дороги, порты, таможенные и пограничные пункты), перерабатывающих заводов, пунктов энергопотребителей (биотопливо и пиролизный газ) и других потребителей древесины.

С использованием данной информации формируется структура доступности лесозаготовительных территорий относительно размещения потребителей древесины как продукта или источника, создающего дополнительные технологические и хозяйственные процессы. Анализ лесного фонда различных лесопромышленных предприятий ДФО показал, что по степени удаленности площадей, на которых сконцентрированы основные запасы спелой и качественной древесины, территории можно разделить на четыре зоны доступности (рис. 2, рис. 3).



Рис. 2. Структура зон доступности лесозаготовительных территорий ДФО

Fig. 2. Structure of availability zones of forest exploitation territories of the Far Eastern Federal District

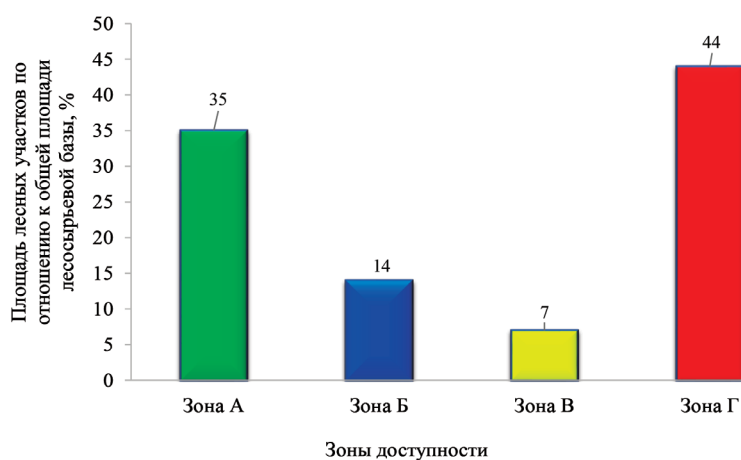


Рис. 3. Соотношение зон доступности и общей площади лесного фонда ДФО

Fig. 3. Percentage ratio of the availability zones and the total area of the forest fund of the Far Eastern Federal District

Как было выявлено в ходе анализа ряда отечественных и зарубежных теоретических и прикладных исследований, комплексными технологическими системами, способными транспортировать заготовленную древесину, обеспечивая при этом эффективную работу по преодолению водных преград и заболоченных мест, могут являться только воздушные транспортные средства на основе аэростатической подъемной силы – дирижабли гибридного типа (комбинация аэростата с винтокрылым летательным аппаратом, их развитие связано с попыткой получить более высокие аэродинамические характеристики, чем у классических управляемых аэростатов). Кроме того, данные средства способны одновременно с переместительно-транспортными операциями с заготовленной древесиной обеспечить доставку на труднодоступные лесные участки рабочего персонала, техники, оборудования и элементов инфраструктуры [4, 20, 26].

Говоря о комплексной эффективности дирижабля как вида транспортно-го средства, возможного к использованию в лесном комплексе на различных операциях (подготовительные, инфраструктурные, вспомогательные, лесозаготовительные, транспортные), необходимо отметить его широкие возможности при решении задач по защите и восстановлению лесов.

Так, на этапе подготовительных работ, которые в первую очередь связаны с инфраструктурным обеспечением лесозаготовительного процесса, использование крупнотоннажных дирижаблей может полностью исключить затраты на строительство и содержание лесных дорог и дорожных инженерных сооружений. Применение в лесопромышленном производстве модульных технологий компоновки деревообрабатывающих цехов позволит оперативно возводить их в точках локации лесозаготовок с последующей перебазировкой данного технологического оборудования в планируемые места проведения будущих работ.

С начала 70-х гг. прошлого века создан и испытан ряд образцов различных аэростатических летательных аппаратов (АЛА), в число функций которых входила и транспортировка древесины из труднодоступных мест.

Преимущественно это были гибридные дирижабли, информация об основных моделях которых представлена на рис. 4 и в табл. 1.

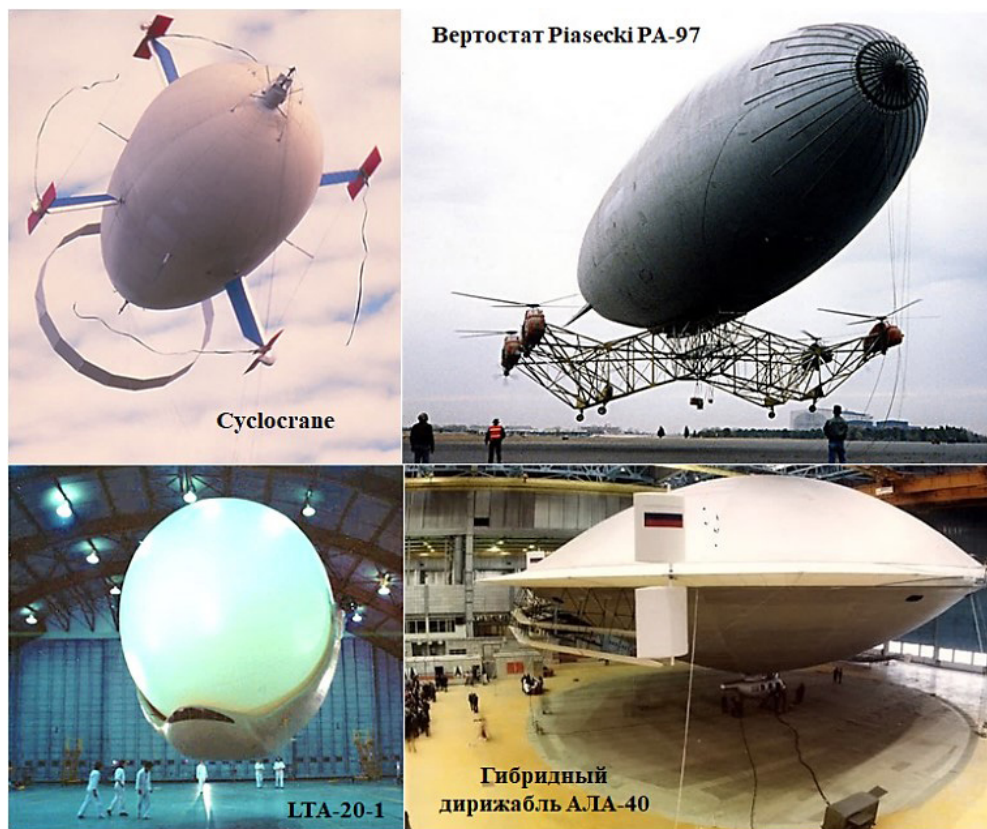


Рис. 4. Основные виды созданных гибридных дирижаблей

Fig. 4. The main types of created hybrid airships

АЛА имеет значительно бóльшую по сравнению со всеми существующими транспортными средствами удельную грузоподъемность (отношение массы перевозимого им груза к полной полетной массе), обладает высокой транспортной производительностью (произведение веса перевозимого груза на дальность транспортировки) и более низкой удельной стоимостью конструкции (отношение стоимости конструкции к единице транспортной производительности) за счет большой грузоподъемности и сравнительно малого расхода топлива [3, 14, 26, 29]. Наличие жесткой оболочки у конструкций АЛА нового поколения, позволяющей осуществлять стоянки эллингов под открытым небом, и специально разработанный метод скоростного амортизированного причаливания с последующей автоматической швартовкой на поворотную площадку причального сооружения дают возможность снижения стоимости эксплуатации в отличие от конструкций дирижаблей 70–80 гг. прошлого столетия: процесс их швартовки был сложен и трудоемок, требовал участия многочисленной наземной команды [31].

Таблица 1

Основные виды созданных экспериментальных гибридных дирижаблей,
предназначенных для грузовых и транспортно-монтажных операций

| Модель | Страна-разработчик, производитель | Год проведения производственных испытаний | Грузоподъемность, т | Форма | Габариты, м | Объем оболочки, м ³ | Способ создания подъемной силы и управления ей |
|--------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------|---|--|--------------------------------|--|
| АЛА-40 | СССР/РФ | 1991–92 | 2,15–3,5 | Дискообразная | Д = 40 | 10 660 | Аэростатический + изменение температуры горячего воздуха и гелия + использование винтомоторных установок |
| Аэрогране | США, Канада | 1972–78 | Прототип без загрузки | Сферическая с 4 лопастями по экватору | Д = 6; Р = 13 | 30 | Аэростатический + эффект Магнуса |
| CycloCrane | США, Канада | 1979–82 | 1,8 | Эллипсоидная с ротороной ситемой лопастей | Дл = 56; Д = 21; В = 21; Р = 21 | 9350 | Аэростатический + эффект Магнуса |
| Piasecki PA-97 Heli-Stat | США | 1986 | 21,5 | Эллипсоидная | Дл = 104,5; Д = 34; Р = 57 | 28 300 | Использование винтомоторных установок + аэростатический |
| LTA-20-1 | США | 1981 | Прототип без загрузки | Сферическая | Д = 6,1 | 30 | Аэростатический + эффект Магнуса |

Примечание: Д – диаметр корпуса; Дл – длина корпуса; В – ширина корпуса по миделю; Р – размах с учетом размеров лопастей.

В настоящее время глубоко проработаны и готовы к промышленному выпуску две конструкции гибридного дирижабля: «Атлант-30» грузоподъемностью до 16 т и «Атлант-100» грузоподъемностью до 60 т (при дальности перемещения до 2000 км и скорости движения 130–150 км/ч) (рис. 5) [20].



Рис. 5. Общий вид гибридного дирижабля «Атлант»

Fig. 5. General view of the ATLANT hybrid airship

Дирижабли с большой грузоподъемностью имеют ряд преимуществ перед вертолетами при перевозке грузов значительной массы: возможность транспортировки неделимых грузов, по габаритам превышающим габариты дирижабля; отсутствие необходимости посадки на специально оборудованные места; работа без дозаправки в течение длительного времени и др. [1, 31].

Для реализации цели исследования предлагается сформулировать ее как задачу многокритериального структурно-параметрического синтеза на базе принципов оптимального управления [10, 21, 22, 27, 28]. основополагающие критерии управления в области лесопромышленного производства – эффективность производственно-технологических и лесохозяйственных мероприятий. В качестве параметров принимаются природно-климатические условия на отведенных в рубку лесных участках, а управляющих воздействий – конструктивно-кинематические параметры дирижаблей. Выбор «наилучшего» решения в этом случае сводится к нахождению минимального отклонения от индивидуальных оптимальных значений параметров и структуры по всем критериям одновременно [15, 19, 24, 25, 30].

Поиск оптимальных систем АЛА для выполнения всего комплекса работ с математической точки зрения можно представить как задачу структурно-параметрического синтеза оборудования и технологии его применения в рамках природно-климатических условий лесозаготовительного участка, при которых показатели качества стремятся к своим экстремальным значениям [5, 8].

Анализируемые (эксплуатационные и кинематические) параметры исследуемых моделей оборудования (дирижаблей) X_0 и параметры технологии их использования X_1 описываются некоторыми идентификаторами (идентификатор – уникальный признак объекта, позволяющий отличать его от других объ-

ектов), учитывающими все многообразие характеристик оборудования. Обозначим эти идентификаторы как I_s ($s = 1; 2; \dots; k$), где s – номер идентификатора. Их числовые значения зависят от ряда конструктивно-кинематических параметров АЛА, реализуемых технологических операций, природно-климатических условий мест эксплуатации оборудования.

Задача поиска оптимальной модели оборудования заключается в поиске таких значений его параметров для лесорастительных условий, при которых функционалы I_s достигают экстремальных значений в области заданных ограничений [22, 24]:

$$\Gamma_s < I_s < \Gamma_s,$$

где Γ_s, Γ_s – пограничные (нижние и верхние) значения I_s .

Математическая постановка задачи поиска оптимальных вида и модели оборудования рассматривается как минимизация векторного критерия:

$$(\Xi): \Xi = \phi(W, T, D, M, B), \quad (1)$$

где W, T, D, M, P, B – диапазоны целевых функционалов;

$$\max W_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) W(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\min T_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) T(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\max D_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) D(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\min M_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) M(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\min B_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) B(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t,$$

t_n, t_k – интервал времени функционирования оборудования в заданных природно-климатических и производственных условиях; $Y_i \min, Y_i \max$ – пограничные значения i -й характеристики разрабатываемых лесных участков; Y_p – природно-климатические условия эксплуатации оборудования; $\phi(y, t)$ – обобщенная совместная плотность распределения природно-климатических параметров лесных участков; X_M – эксплуатационные (геометрические и кинематические) параметры оборудования; X_T, Y – параметры выполняемых технологических операций, природно-климатических и производственных условий, в которых используется оборудование соответственно; $W(X_M, X_T, Y), T(X_M, X_T, Y), D(X_M, X_T, Y), M(X_M, X_T, Y), B(X_M, X_T, Y)$ – математические модели производительности, транспортной энергоёмкости, удельной грузоподъёмности, материалоемкости и удельных капитальных вложений аэростатических летательных аппаратов соответственно.

Физический смысл данной постановки задачи сводится к поиску таких параметров машин (X_M) и технологических процессов (X_T) из области их реализуемости для заданных состояний предмета труда (y) (дерево, хлыст и т. д.),

которые в различных природных условиях (yp) минимизируют затраты энергии и времени на осуществление технологического процесса, потери древесного сырья, повреждения почвы и оставляемых на лесосеке деревьев, молодняка и подроста.

Таким образом, сущность предлагаемой постановки задачи определяется как выявление таких конструктивно-кинематических параметров оборудования и параметров технологии их использования, которые в различных природно-климатических условиях эксплуатации данного оборудования минимизируют величину векторного критерия (1).

Как было сказано, процесс поиска оптимального вида (модели) АЛЖ и установления уровня его эффективности при использовании в различных природно-климатических условиях сводится к решению задачи векторного нелинейного программирования [24]. Анализируемые критерии оптимизации носят двойственный характер, поэтому для комплексного учета возможных значений частных критериев возьмем векторный критерий оптимальности, позволяющий решить задачу многокритериальной оптимизации [9, 12], результат которой будет в совокупности компромиссным для вектора

$$\Xi(X_M, X_T, Y) = [W_\Sigma, T_\Sigma, D_\Sigma, M_\Sigma, B_\Sigma].$$

Решением задачи по поиску компромиссного решения $X^* \in D^*$ является нахождение такой точки, для которой справедливо неравенство [31]:

$$\Xi(X^*, X^*, Y) \leq \Xi(X, X, Y) \forall X^* \in D^*.$$

Таким образом, если для любой составляющей верно условие $\Xi(X_M^*, X_T^*, Y) \leq \Xi(X_M, X_T, Y)$, то по крайней мере для одного из исследуемых критериев найдется точка, в которой неравенство $\Xi_i(X_M^*, X_T^*, Y) > \Xi_i(X_M, X_T, Y)$ выполняется.

Количество всех эффективных точек определено как область компромиссов, оптимальных по Паретто [22, 25], из чего следует вывод о невозможности дальнейшего улучшения параметра одного из частных критериев при условии, что хотя бы один из остальных не ухудшил при этом своего значения. Таким образом, для нахождения экстремума компромиссного вектора (по Паретто) необходимо перейти к задаче нелинейной оптимизации сформированной скалярной функции цели:

$$\Xi(X_M, X_T, Y) = \phi\{W_\Sigma, T_\Sigma, D_\Sigma, M_\Sigma, B_\Sigma\}.$$

Сформируем свертку критериев:

$$\Xi(X_M, X_T, Y) = \sum_{i=1}^s \eta_i [\hat{L}] \forall \eta_i \geq 0, 0; \sum_{i=1}^s \eta_i = 1, 0;$$

$\hat{\Xi}(X_M, X_T, Y) = (L(X_M, X_T, Y) - L_i^*) / L_i^*$ – для минимизируемых критериев (транспортная энергоёмкость, материалоемкость, удельные капитальные вложения); $\hat{\Xi}(X_M, X_T, Y) = L_i^* / (L(X_M, X_T, Y) - L_i^*)$ – для максимизируемых критериев (производительность, удельная грузоподъемность).

Здесь L – дальность полета, км; L_i^* – значение i -го критерия, определенное при поиске оптимальных параметров с учетом единственного i -го показателя качества, η_i – коэффициент приоритетности i -го показателя качества.

Таким образом, комплексная целевая функция может быть определена в виде

$$\Xi = \left[\begin{array}{c} \frac{W_{\Sigma}^*}{W_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - W_{\Sigma}^*} - \frac{T_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - T_{\Sigma}^*}{T_{\Sigma}^*} - \frac{D_{\Sigma}^*}{D_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - D_{\Sigma}^*} \\ - \frac{M_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - M_{\Sigma}^*}{M_{\Sigma}^*} - \frac{B_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - B_{\Sigma}^*}{B_{\Sigma}^*} \end{array} \right] \Rightarrow \min, (2)$$

где $W_{\Sigma}^*, T_{\Sigma}^*, D_{\Sigma}^*, M_{\Sigma}^*, B_{\Sigma}^*, W_{\Sigma}, T_{\Sigma}, D_{\Sigma}, M_{\Sigma}, B_{\Sigma}$ – диапазон экстремальных и текущих значений частных критериев соответственно.

Показатели качества аэростатических летательных аппаратов представлены в виде математических зависимостей [3, 15]:

производительность, т·км/ч,

$$W = G_{\text{кз}} V_{\text{кр}},$$

где $G_{\text{кз}}$ – коммерческая загрузка, т; $V_{\text{кр}}$ – крейсерская скорость полета, км/ч;

транспортная энергоёмкость, кВт·ч/т·км,

$$T = \frac{N_{\text{кр}}^{\text{ср}}}{W},$$

$N_{\text{кр}}^{\text{ср}}$ – средняя мощность двигателей на крейсерском режиме, кВт;

удельная грузоподъемность

$$D = \frac{G_{\text{гр}}}{G_{\text{взл}}},$$

$G_{\text{гр}}$ – масса перевозимого груза, т; $G_{\text{взл}}$ – взлетная масса АЛА, т;

материалоемкость, т,

$$M = \frac{G_{\text{пуст}}}{G_{\text{гр}}},$$

$G_{\text{пуст}}$ – масса порожнего АЛА, т;

транспортная производительность, т·км,

$$P = G_{\text{гр}} L;$$

удельные капитальные вложения

$$B = \frac{0,1\Pi_{\text{л.а}}}{G_{\text{гр}} V_{\text{кр}}^{\text{ср}} T_{\text{нал}}},$$

$\Pi_{\text{л.а}}$ – цена летательного аппарата, р.; $T_{\text{нал}}$ – годовой налет часов, ч.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки эффективности и возможности применения конкретных моделей АЛА в труднодоступных лесных массивах предлагается методика, базирующаяся на возможностях числовых математических систем и способов управления базами данных (БД). Пример алгоритма работы по предлагаемой методике приведен на рис. 6 на основе языка UML в виде пошагового движения [6, 7, 16]. Такой способ оценки предполагается реализовать в виде компьютерной программы (КП), блок-схема работы по предлагаемой методике учитывает все специфические свойства компьютерных программ.

Для проектирования внутренней логической структуры программы использована диаграмма классов. После спецификации возможностей программы

и разработки основных алгоритмов предполагается ее моделирование на языке UML в рамках унифицированного процесса моделирования. Согласно UML, построение диаграмм производится в установленной последовательности. После моделирования программы, реализующей методику оценки применимости и эффективности моделей дирижаблей, планируется разработка этапа создания файлов расчета в математической системе MathCAD и программирования в системе управления БД Microsoft Access [11, 18].



Рис. 6. Пошаговое движение UML «Оценка применимости специализированного лесотранспортного оборудования»

Fig. 6. UML stepwise motion “Evaluating the Applicability of Specialised Forest Transport Equipment”

Первый шаг: КП позволяет заказчику дать самостоятельную оценку возможности использования всех внесенных в нее моделей анализируемого оборудования. При этом устанавливаются и интерактивно удаляются из БД модели, которые не применимы из-за существующих нормативно-правовых, конструктивных или технологических ограничений. Второй шаг: КП оценивает применимость моделей оборудования. Оценка осуществляется пошаговой проверкой массива данных для каждой модели АПА по климатическим и лесорастительным характеристикам разрабатываемых лесных территорий (сезонному температурному режиму, скорости и направлению ветра, рельефу местности, направлению доставки груза относительно мест заготовки и др.). По итогам реализации первых четырех шагов представленной блок-схемы для каждой модели оборудования устанавливается результирующий массив разрабатываемых лесных территорий, на площади которых применима данная модель.

Пятый шаг: КП путем интегрирования полученной информации по всем лесным участкам в пределах отведенной в рубку территории рассчитывает для рассматриваемой модели объем древесины, возможный к доставке на центральный склад. Последний шаг: установка применимости данной модели по продолжительности ее эксплуатации в конкретных климатических и лесорастительных условиях. После этапа определения модели АЛА по критерию ее применимости (минимизация комплексной целевой функции (2)) проводится его сравнительная экономическая оценка с другими типами летательных аппаратов по методике, представленной в [17]. Пример алгоритма работы по данной методике представлен на рис. 7.



Рис. 7. Пошаговое движение UML «Оценка экономической эффективности специализированного лесотранспортного оборудования»

Fig. 7. UML stepwise motion “Evaluating the Economic Efficiency of Specialised Forest Transport Equipment”

К вопросам сравнения АЛА с другими видами транспортных средств ученые-экономисты обращались неоднократно. Так, например, проводился сравнительный анализ основных характеристик современных моделей АЛА и вертолетов, устанавливались области их применения, определялись экономически выгодные виды работ и т. п. [1, 4, 20].

Сравнительную оценку экономической эффективности различных моделей АЛА и наземного автомобильного транспорта в лесопромышленном комплексе предполагается осуществить также в виде КП.

Результаты предварительных расчетов при сравнении различных видов транспортных средств для доставки лесной продукции (на примере пиловочника) от мест заготовки до склада, расположенного на расстоянии 50 км, представлены в табл. 2. Значения анализируемых параметров для автолесовозов получены из годовых финансовых отчетов лесопромышленных предприятий Хабаровского края с учетом эксплуатации этих машин на уже проложенной сети лесных дорог.

Таблица 2

Показатели основных эксплуатационных затрат

| Параметр | Транспорт | | | | |
|--|--|---------------------------------|---------------------------------|--|--|
| | Ми-26Т | Атлант-30 | Атлант-100 | Автолесовоз «Ивеко АМТ 633920» | |
| | | | | без учета строительства дорог и другой инфраструктуры | с учетом строительства комплекса лесовозных дорог общей протяженностью более 50 км |
| Стоимость 1 т·км, р. | 113,20 по статистическим данным за период 2015–2018 гг. | 35,31 по результатам расчета | 24,31 по результатам расчета | 7,18 по статистическим данным за период 2015–2018 гг. | 233,00–379,00 в зависимости от природно-производственных условий по статистическим данным за период 2015–2018 гг. |
| Топливная эффективность (расчетная), кг/т·км | 0,620 | 0,170 | 0,120 | 0,024 | 0,024 |

Если учесть, что в настоящее время в условиях дальневосточного региона на строительство и содержание 1 км лесовозной дороги затрачивается до 1,2–3,5 млн р. (средняя величина для всей сети дорог – ус, ветка, магистраль), то предварительные расчеты показывают увеличение стоимости доставки груза автолесовозным транспортом по сравнению с АЛ в 10–15 раз. При этом необходимо отметить, в настоящих расчетах не учитывалась экологическая составляющая – дополнительные затраты в виде штрафов за нарушение лесоводственных и экологических требований при строительстве сети лесовозных дорог.

Изучение вопроса экологических аспектов использования АЛ в лесопромышленном комплексе является для авторов одним из перспективных направлений дальнейших исследований.

Заключение

Вопрос освоения труднодоступных лесных территорий актуален не только для Дальневосточного федерального округа, но и для всех регионов РФ, обладающих большими запасами лесных ресурсов и слаборазвитой дорожной сетью. На основании выполненных теоретических исследований сделан вывод, что для транспортировки заготовленной на труднодоступных лесных территориях древесины до пунктов ее реализации и специализированного технологического оборудования в места его эксплуатации (лесозаготовительные и деревообрабатывающие участки лесопромышленных предприятий) из всех существующих типов транспортных средств наиболее эффективными по критериям технической доступности и стоимости выполнения работ являются аэростатические летательные аппараты гибридного типа.

Предлагается способ выбора оптимальной модели аэростатического летательного аппарата для применения в лесопромышленном комплексе из существующих на текущий момент времени. Планируется дальнейшая работа по расширению возможностей разрабатываемых математической модели и программного обеспечения, что позволит осуществлять не только выбор оптимального аэростатического летательного аппарата, но и сравнительно-экономический анализ этого аппарата и других видов транспортных средств для доставки древесины от мест ее заготовки (на труднодоступных лесных территориях) до центрального склада лесопромышленного предприятия или потребителя продукции одним пакетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В. Лесотранспортные системы: новые возможности и перспективы развития // Состояние лесов и актуальные проблемы лесопромышленного комплекса / отв. ред. А.П. Ковалев. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2013. С. 101–104. Abuzov A.V. Timber Transport Systems: New Opportunities and Prospects of Development. *State of the Forests, Actual Problems of Forestry and Forest Management*. Ed. by A.P. Kovalev. Khabarovsk, DalNIILH Publ., 2013, pp. 101–104.

2. Абузов А.В., Казаков Н.В. Экологические последствия в лесных насаждениях, подверженных техногенному воздействию при лесозаготовительных и транспортных операциях // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28, № 1. С. 7–18. Abuzov A.V., Kazakov N.V. Ecological Consequences in Forest Stands Exposed to Technogenic Impact during Logging and Transport Operations. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [RUDN Journal of Ecology and Life Safety], 2020, vol. 28, no. 1, pp. 7–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-1-7-18>

3. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Транспортное освоение труднодоступных лесных территорий с применением летательных аппаратов. Хабаровск: ТОГУ, 2020. 115 с. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Transport Development of Hard-to-Reach Forest Territories Using Aircraft*. Khabarovsk, PNU Publ., 2020. 115 p.

4. Абузов А.В., Казаков Н.В., Дмитриева И.Н. Особенности использования вертолета на лесозаготовительных операциях // Инж. вестн. Дона. 2014. № 3. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2469> (дата обращения: 09.12.21). Abuzov A.V., Kazakov N.V., Dmitrieva I.N. Features the Use of Helicopters in Logging Operations. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 3.

5. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем. М.: Наука, 1989. 88 с. Antushev G.S. *Methods of Parametric Synthesis of Complex Technical Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 88 p.
6. Боггс У., Боггс М. UML и Rational Rose: пер. с англ. М.: Лори, 2000. 582 с. Boggs W., Boggs M. *Mastering UML with Rational Rose*. Translated from English. Moscow, Lori Publ., 2000. 582 p.
7. Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. М.: Бинوم, 1999. 560 с. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. *The Unified Modeling Language User Guide*. Translated from English. Moscow, Binom Publ., 1999. 560 p.
8. Волкович В.Л. Многокритериальные задачи и методы их решения // Кибернетика. 1998. № 5. С. 68–73. Volkovich V.L. Multi-Criteria Problems and Methods of Their Solution. *Kibernetika*, 1998, no. 5, pp. 68–73.
9. Глушков В.М., Иванов В.В., Яненко В.Н. Моделирование развивающихся систем. М.: Наука, 1983. 350 с. Glushkov V.M., Ivanov V.V., Yanenko V.N. *Modeling of Developing Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 350 p.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 2002. 479 с. Gmurman V.E. *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 479 p.
11. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. М.: СК Пресс, 1998. 352 с. D'yakonov V.P. *Handbook for MathCAD PLUS 7.0 PRO*. Moscow, SK Press Publ., 1998. 352 p.
12. Исаков В.Н. Элементы численных методов. М.: Академия, 2003. 192 с. Isakov V.N. *Elements of Numerical Methods*. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 192 p.
13. Ковалев А.П. Эколого-лесоводственные основы рубок в лесах Дальнего Востока. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2004. 270 с. Kovalev A.P. *Ecological and Forestry Bases of Felling in the Forests of the Far East*. Khabarovsk, DalNIILH Publ., 2004. 270 p.
14. Козловский В.Б., Худоленко О.В., Деревянко В.С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. М.: Воздушный транспорт, 2007. 480 с. Kozlovsky V.B., Khudolenko O.V., Derevyanko V.S. *Balloon Aircrafts for Economic Sectors*. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 2007. 480 p.
15. Лазарев И.А., Балужин В.М. Математическая постановка задачи структурно-параметрического синтеза сложных технических систем // Вопросы кибернетики: Системные принципы организации моделей развития. М., 2011. С. 105–123. Lazarev I.A., Baluzin V.M. Mathematical Formulation of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Complex Technical Systems. *Cybernetics Issues: System Principles of Organization of Development Models*. Moscow, 2011, pp. 105–123.
16. Леоненков А.В. Самоучитель UML. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. 304 с. Leonenkov A.V. *UML Self-Study Guide*. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2001. 304 p.
17. Малахова Л.А. Анализ себестоимости продукции лесозаготовок // Лесн. пром-сть. 1986. № 2. С. 27–28. Malakhova L.A. Analysis of the Cost of Logging Products. *Lesnaya promyshlennost'*, 1986, no. 2, pp. 27–28.
18. Плис А.И., Сливина Н.А. MathCAD: математический практикум для экономистов и инженеров. М.: Финансы и статистика, 1999. 656 с. Plis A.I., Slivina N.A. *MathCAD: Mathematical Workshop for Economists and Engineers*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1999. 656 p.
19. Рябухин П.Б. Моделирование технологических процессов в лесопромышленном комплексе. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 168 с. Ryabukhin P.B. *Modeling of Technological Processes in the Timber Industry Complex*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 168 p.

20. Рябухин П.Б., Абузов А.В. Горным лесоразработкам – средосберегающее технологическое оборудование // Лесн. хоз-во. 2008. № 6. С. 36–37. Ryabukhin P.B., Abuzov A.V. Mountain Logging – Environment-Saving Technological Equipment. *Lesnoye khozyaystvo*, 2008, no. 6, pp. 36–37.

21. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М., 2006. 110 с. Sobol' I.N., Statnikov R.B. *Optimal Parameter Choice in Problems with Many Criteria*. Moscow, Nauka Publ., 2006. 110 p.

22. Солодовников В.В., Зверев В.Ю. Применение методов теории автоматического управления и многокритериальной оптимизации для автоматизации проектирования АСУ ТП. М.: Машиностроение, 1984. 48 с. Solodovnikov V.V., Zverev V.Yu. *The Use of Methods of Automatic Control Theory and Multi-Criteria Optimization for Automated Control System Design Automation*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 48 p.

23. Урусов В.М. Дальний Восток: природопользование в уникальном ландшафте. Владивосток: Дальнаука, 2000. 340 с. Urusov V.M. *The Far East: Nature Management in a Unique Landscape*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000. 340 p.

24. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с. Himmelblau D. *Applied Nonlinear Programming*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1975. 536 p.

25. Якимович С.Б. Постановка и решение задачи синтеза и оптимального управления технологическими процессами лесозаготовок // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2003. № 5. С. 96–103. Yakimovich S.B. Organization and Solution of Problem of Syntheses and Optimum Management of Technological Processes of Logging. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2003, no. 5, pp. 96–103.

26. Aglietti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2032–2041. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.43332>

27. *Balloon Logging Systems. Phase I – Analytical Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 110 p.

28. *Balloon Logging Systems. Phase II – Logistics Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 171 p.

29. Developing a Forest Conservation Strategy for the Russian Far East. *Russia Country Report 2002/2003*. Ed. by H. Kakizawa, M. Inoue. Hayama, Japan, IGES, 2004, pp. 1–42.

30. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. *Pattern Classification*. New York, Wiley, 2000. 688 p.

31. Guimier D.Y., Vern Wellburn G. *Logging with Heavy-Lift Airships*. Technical Report No. TR-58. Vancouver, FERIC, 1984. 115 p.

32. Hughes N., Penner P. Today's Foresters Need Conflict Resolution Skills. *Forest Chron.*, 2001, vol. 77, no. 6, p. 563.

33. *People and Forest – Policy and Local Reality in Southeast Asia, the Russian Far East, and Japan*. Ed. by M. Inoue, H. Isozaki. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003. 374 p.

34. Sheingauz A. *Overview of the Forest Sector in the Russian Far East*. *Forest Trends*, 2004. 55 p. Available at: https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/Sheingauz_rev.pdf (accessed 10.12.20).

УДК 630*378.33

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛОСКИХ СПЛОТОЧНЫХ ЕДИНИЦ НА ПЕРВОНАЧАЛЬНОМ СПЛАВЕ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

В.В. Васильев¹, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [ABG-5020-2021](https://orcid.org/0000-0002-5763-1650),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5763-1650>

Д.Н. Афоничев², д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [J-8541-2017](https://orcid.org/0000-0001-9066-6428),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

¹Филиал АО «Управляющая Компания ЭФКО», ул. Фрунзе, д. 2, г. Алексеевка, Белгородская обл., Россия, 309850; e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru

²Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, д. 1, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: dmafonichev@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 04.12.20 / Принята к печати 10.02.21

Аннотация. Запрет молевого сплава, использовавшегося на первоначальном сплаве лесоматериалов, привел к удорожанию поставок лесоматериалов потребителям. В настоящее время развитие технологии сплавных работ на малых и средних реках идет в двух направлениях. Первое заключается в использовании на первоначальном сплаве пакетов (микропучков), которые после проплава по рекам с лимитирующими габаритами сплавного хода соединяются, например, в двухъярусный пакет сплоточных единиц. Второе направление – применение на первоначальном сплаве плоских сплоточных единиц. Для внедрения современных плоских сплоточных единиц на этапе первоначального сплава лесоматериалов необходимо глубокое обоснование экономического преимущества этих сплоточных единиц по отношению к микропучкам. Оценку предложено выполнять с использованием представленного в статье неравенства, выражающего, с одной стороны, затраты на сплотку плоских сплоточных единиц с последующим объединением их в более крупные лесотранспортные единицы, сплав вольницей плоских сплоточных единиц, формирование из них плотов, буксировку этих плотов, приобретение машин и оборудования для организации сплава, а также затраты на вывозку сухопутным транспортом лесоматериалов, которые остаются от заготовленной за год древесины из-за закрытия навигации и ограничения объема сплава недостаточной пропускной способностью водного пути, а с другой стороны, аналогичные показатели для сплава на базе микропучков. Получены аналитические зависимости, устанавливающие названные показатели. Ученные в методике затраты, возникающие при вывозке лесоматериалов сухопутным транспортом, указывают на то, что по причине неэффективности использования пропускной способности сплавного хода уменьшается объем сплава лесоматериалов на заданном участке сплавного пути. Следовательно, появляется необходимость поставки на рейды оставшихся лесоматериалов сухопутным транспортом. Внедрение плоских сплоточных единиц при первоначальном сплаве лесоматериалов должно обеспечить более высокую пропускную способность сплавного пути по сравнению с микропучками за счет уменьшения осадки, а следовательно, объема лесоматериалов, доставляемых на рейды дорогостоящим сухопутным транспортом.

Для цитирования: Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Использование плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 128–142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142

Ключевые слова: первоначальный сплав лесоматериалов, плоская сплottedная единица, плот, эффективность сплава, габариты сплавного хода, пропускная способность водного пути.

THE USE OF FLAT RAFTING UNITS DURING THE INITIAL TIMBER RAFTING

*Vladimir V. Vasiliev*¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABG-5020-2021](https://orcid.org/0000-0002-5763-1650), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5763-1650>

*Dmitry N. Afonichev*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-8541-2017](https://orcid.org/0000-0001-9066-6428), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

¹Branch of AO “EFKO Management Company”, ul. Frunze, 2, Alekseevka, Belgorod Region, 309850, Russian Federation; e-mail: vasiliev.vladimir87@mail.ru

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

Original article / Received on December 4, 2020 / Accepted on February 10, 2021

Abstract. The prohibition of drift floating used in the initial timber rafting led to an increase in the cost of supplying timber to consumers. Nowadays, the technology for rafting operations on small and medium-sized rivers is developing in two directions. The first is the use of bunches (micro-bundles) in initial timber rafting which, after rafting along the rivers with limiting rafting dimensions, are joined together to form, for example, a two-tiered bunch of rafting units. The second is the use of flat rafting units in initial timber rafting. In order to implement modern flat rafting units in initial timber rafting, an in-depth substantiation of the economic advantages of these rafting units compared to micro-bundles is required. The article proposes to carry out the assessment by using an inequality. At one end the inequality expresses the costs for rafting of flat rafting units with their subsequent joining into larger timber transportation units, drift floating of flat rafting units, forming rafts from them, towing these rafts, purchasing machines and equipment to organize rafting, and expenses for hauling the timber, which remain from the wood harvested during the year due to the close of navigation and limitation of rafting volume by insufficient carrying capacity, by overland transport. At the other end the inequality expresses similar parameters for micro-bundle rafting. Analytical dependencies setting up the above-mentioned parameters are found. The costs for timber hauling by overland transport considered in the method indicate that due to inefficient use of the carrying capacity of the rafting stroke the volume of timber rafting on a given section of the rafting route decreases. Consequently, there is a need to deliver the remaining timber to floating depots by land transport. The implementation of flat rafting units in initial timber rafting should provide higher carrying capacity of a rafting route compared to micro-bundles by reducing the draft and hence the volume of timber delivered to the floating depots by expensive overland transport.

For citation: Vasiliev V.V., Afonichev D.N. The Use of Flat Rafting Units during the Initial Timber Rafting. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 128–142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142

Keywords: initial timber rafting, flat rafting unit, raft, efficiency of rafting, dimensions of the rafting stroke, carrying capacity of the rafting route.

Введение

На сегодняшний день транспортировка древесины осуществляется различными способами [1–3, 5, 13–23], каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Как правило, применение автомобильного транспорта эффективно при перевозках на расстояние до 200 км. Если оно превышает 200 км, то необходим более экономически выгодный вид транспортировки, одним из них является использование водного пути [5, 7, 10–12]. В этом случае не требуется строительство дорог, а затрачиваемые на транспортировку 1 тыс. м³ древесины на 100 км ресурсы имеют меньшие значения по сравнению с затратами на применение других видов транспорта. Таким образом, при транспортировке древесины на большие расстояния целесообразно использовать водные артерии – сплав лесоматериалов и судовые перевозки.

Первоначальный сплав лесоматериалов до принятия Водного кодекса Российской Федерации [5] осуществлялся путем молевого сплава лесоматериалов, или сплава сплоченных единиц вольницей, на всех водных объектах, где из-за лимитирующих габаритов сплавного хода буксировка плотов и кошелей невозможна. Запрет молевого сплава привел к увеличению стоимости поставок лесоматериалов потребителю. Развитие технологии сплава на малых и средних реках осуществляется в двух направлениях. Первое заключается в применении на первоначальном сплаве пакетов (микроручков), которые после проплава по рекам с лимитирующими габаритами сплавного хода сплавиваются, например, в двухъярусный пакет сплоченных единиц. Данную технологию разрабатывали многие ученые, в т. ч. Посыпанов С.В. [11, 12]. Второе – в использовании на первоначальном сплаве плоских сплоченных единиц [5, 7, 10]. Разработкой данного направления занимались Митрофанов А.А., Суров Г.Я., Войтко П.Ф., Папонов Н.Н., Федулов В.М. и др. При этом необходимо отметить, что применение на сплаве микроручков и плоских сплоченных единиц уже давно известно [6, 8, 9]. Микроручки, как правило, использовали при сплаве тонкомерных круглых лесоматериалов хвойных пород [8] (диаметр пучка принимался равным максимальному диаметру круглого лесоматериала), а плоские сплоченные единицы – при сплаве специальных ценных сортиментов или сплаве любых круглых лесоматериалов, например, в однорядных плотках по мелководным рекам с глубиной до 0,7 м [8].

На данный момент, по нашему мнению, наиболее перспективно развивать первоначальный сплав древесины на базе плоских сплоченных единиц, что требует установления экономической эффективности использования данного вида транспортировки древесины в определенных условиях плавания. Причем конструкции плоских сплоченных единиц обязаны обеспечивать формирование плотов [4, 5, 7, 10] для рек с малыми глубинами и иметь способность к укладыванию в специальные [1, 6, 8] баржи и суда.

Цель исследования – обоснование экономической эффективности использования плоских сплоченных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов.

Объекты и методы исследования

Для выбора технологии работ на первоначальном сплаве необходимо сравнительное обоснование экономической целесообразности использования различных сплоченных единиц в одинаковых условиях плавания. Для сравни-

тельного анализа взяты сплоточные единицы, имеющие прямоугольную конфигурацию (плоские сплоточные единицы), и сплоточные единицы цилиндрической формы – пакеты круглых лесоматериалов (микропучки). Использование плоских сплоточных единиц является эффективным, если выполняется следующее неравенство:

$$\begin{aligned} & \mathcal{Z}_{\text{СПСЕ}} n_{\text{СПСЕ}} + \mathcal{Z}_{\text{ФПСЕ}} n_{\text{ФПСЕ}} + \mathcal{Z}_{\text{ТПСЕ}} + \mathcal{Z}_{\text{ППСЕ}} n_{\text{ППСЕ}} + \mathcal{Z}_{\text{БПСЕ}} n_{\text{БПСЕ}} + \\ & + \frac{\mathcal{Z}_{\text{МПСЕ}}}{t_{\text{СПСЕ}}} + \mathcal{Z}_{\text{СТПСЕ}} < \mathcal{Z}_{\text{СПМП}} n_{\text{СПМП}} + \mathcal{Z}_{\text{ФПМП}} n_{\text{ФПМП}} + \mathcal{Z}_{\text{ТПМП}} + \\ & + \mathcal{Z}_{\text{ППМП}} n_{\text{ППМП}} + \mathcal{Z}_{\text{БПМП}} n_{\text{БПМП}} + \frac{\mathcal{Z}_{\text{МПМП}}}{t_{\text{СПМП}}} + \mathcal{Z}_{\text{СТПМП}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathcal{Z}_{\text{СПСЕ}}$, $\mathcal{Z}_{\text{СПМП}}$ – затраты на сплотку одной плоской сплоточной единицы, одного микропучка соответственно, тыс. р.; $n_{\text{СПСЕ}}$, $n_{\text{СПМП}}$ – количество изготавливаемых соответственно плоских сплоточных единиц и микропучков, шт.; $\mathcal{Z}_{\text{ФПСЕ}}$, $\mathcal{Z}_{\text{ФПМП}}$ – затраты на формирование из плоских сплоточных единиц и микропучков соответственно одной укрупненной лесотранспортной единицы, тыс. р.; $n_{\text{ФПСЕ}}$, $n_{\text{ФПМП}}$ – количество формирующихся укрупненных лесотранспортных единиц из плоских сплоточных единиц и микропучков соответственно, шт.; $\mathcal{Z}_{\text{ТПСЕ}}$, $\mathcal{Z}_{\text{ТПМП}}$ – затраты на сплав вольницей плоских сплоточных единиц и микропучков соответственно, тыс. р.; $\mathcal{Z}_{\text{ППСЕ}}$, $\mathcal{Z}_{\text{ППМП}}$ – затраты на формирование из плоских сплоточных единиц и микропучков соответственно одного плота, тыс. р.; $n_{\text{ППСЕ}}$, $n_{\text{ППМП}}$ – количество плотов, изготавливаемых для буксировки плоских сплоточных единиц, шт.; $\mathcal{Z}_{\text{БПСЕ}}$, $\mathcal{Z}_{\text{БПМП}}$ – затраты на буксировку одного плота из плоских сплоточных единиц, тыс. р.; $n_{\text{БПСЕ}}$, $n_{\text{БПМП}}$ – количество планируемых для буксировки плотов из плоских сплоточных единиц и микропучков соответственно, шт.; $\mathcal{Z}_{\text{МПСЕ}}$, $\mathcal{Z}_{\text{МПМП}}$ – затраты на приобретение машин и оборудования для организации сплава в плоских сплоточных единицах и микропучках соответственно, тыс. р.; $t_{\text{СПСЕ}}$, $t_{\text{СПМП}}$ – срок полезного использования машин и оборудования, приобретенных для организации сплава древесины в плоских сплоточных единицах и микропучках соответственно, лет; $\mathcal{Z}_{\text{СТПСЕ}}$, $\mathcal{Z}_{\text{СТПМП}}$ – затраты, возникающие при вывозке сухопутным транспортом лесоматериалов, которые остаются от заготовленной за год древесины из-за закрытия навигации и ограничения объема сплава древесины в плоских сплоточных единицах и микропучках соответственно, тыс. р.

Результаты исследования и их обсуждение

Затраты, связанные с изготовлением одной плоской сплоточной единицы и микропучка, формируются из заработной платы работников, задействованных на сплотке, стоимости горюче-смазочных материалов (ГСМ), требуемого количества сплоточного такелажа и т. д. Сплав круглых лесоматериалов в микропучках на 47 % дешевле по сравнению со сплавом круглых лесоматериалов в плоских сплоточных единицах [6]. При сплаве сплоточных единиц выполняется единый алгоритм работ, поэтому основная разница затрат образуется при изготовлении сплоточных единиц, а значит, можно принять, что стоимость изготовления одной плоской сплоточной единицы на 47 % больше стоимости изготовления одного микропучка того же объема.

Количество изготавливаемых плоских сплоточных единиц и микропучков зависит от планируемого навигационного объема сплава лесоматериалов и объема самих сплоточных единиц. Объем сплоточных единиц, в свою очередь, устанавливается габаритами сплавного хода. Таким образом, количество плоских сплоточных единиц и микропучков будет рассчитываться соответственно по формулам:

$$n_{\text{СПСЕ}} = \frac{W_{\text{ГПСЕ}}}{V_{\text{ПСЕ}}}; \quad (2)$$

$$n_{\text{СПМП}} = \frac{W_{\text{ГПМП}}}{V_{\text{ПМП}}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{ГПСЕ}}$, $W_{\text{ГПМП}}$ – максимальный годовой объем сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах и в микропучках соответственно на первоначальном сплаве, м³; $V_{\text{ПСЕ}}$, $V_{\text{ПМП}}$ – объем плоской сплоточной единицы и микропучка соответственно, м³.

В формулах (2) и (3) максимальный годовой объем сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах и микропучках на первоначальном сплаве принимается равным пропускной способности эксплуатируемого сплавного пути в лимитирующем створе реки за одну навигацию на протяжении определенного времени. При этом полученные результаты $n_{\text{СПСЕ}}$, $n_{\text{СПМП}}$ округляются до целого значения в большую сторону, т. к. последняя изготавливаемая сплоточная единица может иметь объем меньше расчетного, а объем сплоточной единицы больше расчетного объема недопустим.

$W_{\text{ГПСЕ}}$, $W_{\text{ГПМП}}$ будут рассчитываться так:

$$W_{\text{ГПСЕ}} = N_{\text{ПССЕ}} \frac{t_{\text{ЧС}} V_{\text{ПСЕ}}}{t_{\text{ИСЕ}}}; \quad (4)$$

$$W_{\text{ГПМП}} = N_{\text{ПССЕ}} \frac{t_{\text{ЧС}} V_{\text{ПМП}}}{t_{\text{ИСЕ}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{ПССЕ}}$ – планируемое количество смен в навигацию, при которых будет осуществляться сплав плоских сплоточных единиц вольницей, шт.; $t_{\text{ЧС}}$ – продолжительность рабочего времени в течение суток, ч; $t_{\text{ИСЕ}}$ – интервал времени между плывущими сплоточными единицами, ч.

Интервал времени между плывущими сплоточными единицами принимается равным от 3 до 4 мин [6, 8]. В практических условиях он зависит от различных факторов и устанавливается индивидуально для разных бассейнов с учетом производственной мощности предприятия.

Объем плоской сплоточной единицы определяется по выражению

$$V_{\text{ПСЕ}} = L_{\text{ПСЕ}} B_{\text{ПСЕ}} H_{\text{ПСЕ}} K_{\text{ПСЕ}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{ПСЕ}}$, $B_{\text{ПСЕ}}$, $H_{\text{ПСЕ}}$ – соответственно длина, ширина и высота плоской сплоточной единицы, м; $K_{\text{ПСЕ}}$ – коэффициент полндревесности плоской сплоточной единицы, для каждой плоской сплоточной единицы он устанавливается в зависимости от диаметра окоренных и неокоренных круглых лесоматериалов, 0,54...0,74 [5].

В выражении (6) длина плоской сплоточной единицы равна длине сплавляемых круглых лесоматериалов, а ее ширина определяется следующим образом:

$$B_{\text{ПСЕ}} = \sqrt{(b_{\text{ЛХ}} - C)^2 - L_{\text{ПСЕ}}^2}, \quad (7)$$

где $b_{\text{ЛХ}}$ – минимальная ширина сплавного хода, м; C – запас для безопасного сплава сплотовых единиц, $C = 2 \dots 3$ м [6, 8].

Высота плоской сплотовой единицы находится по известной [6] зависимости:

$$H_{\text{ПСЕ}} = \frac{T_{\text{ПСЕ}} \rho_{\text{В}}}{\rho_{\text{Д}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{ПСЕ}}$ – допустимая осадка плоской сплотовой единицы, м; $\rho_{\text{В}}$, $\rho_{\text{Д}}$ – плотность воды и древесины соответственно, кг/м³.

Осадку плоской сплотовой единицы равна [6]

$$T_{\text{ПСЕ}} = h_{\text{ЛХ}} - Z \quad (9)$$

где $h_{\text{ЛХ}}$ – минимальная глубина сплавного хода, м; Z – донный запас, $Z = 0,2 \dots 0,3$ м [8].

В формуле (3) объем пачки (микроручка) равен [1]

$$V_{\text{ПМП}} = 0,785 L_{\text{ПМП}} B_{\text{ПМП}} H_{\text{ПМП}} K_{\text{ПМП}}, \quad (10)$$

где $L_{\text{ПМП}}$, $B_{\text{ПМП}}$, $H_{\text{ПМП}}$ – длина, ширина и высота микроручка соответственно, м; $K_{\text{ПМП}}$ – коэффициент полндревесности микроручка, в зависимости от диаметра круглых лесоматериалов принимается равным $0,56 \dots 0,70$ [1].

Принято считать, что при организации первоначального сплава лесоматериалов в пучках объем пачки составляет не более 5 м^3 [8], но при самосплаве пучков, если глубина сплавного хода достаточна для сплава микроручков и недостаточна для плотового сплава, объем пакета может быть увеличен.

Высота микроручка рассчитывается через осадку [1], т. е.

$$H_{\text{ПМП}} = \frac{T_{\text{ПМП}} \rho_{\text{В}}}{\rho_{\text{Д}} \varepsilon_{\text{ПМП}}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{ПМП}}$ – допустимая осадка микроручка, м; $\varepsilon_{\text{ПМП}}$ – опытный коэффициент, равный $0,93 \dots 0,95$ [1].

Допустимая осадка микроручка находится аналогично допустимой осадке плоской сплотовой единицы.

При сплаве микроручков вольницей уделяется большое внимание их прочности, а именно коэффициенту формы $C_{\text{КФ}}$ [8], равному отношению ширины микроручка к его высоте. Причем рекомендуется принимать коэффициент формы $1,5 \dots 1,75$ [8]. Выразим ширину микроручка через его высоту и коэффициент формы, тогда получим следующую зависимость:

$$B_{\text{ПМП}} = H_{\text{ПМП}} C_{\text{КФ}}. \quad (12)$$

Длина микроручка рассчитывается по формуле

$$L_{\text{ПМП}} = \sqrt{(b_{\text{ЛХ}} - C)^2 - B_{\text{ПМП}}^2}. \quad (13)$$

Выражение (13) дает возможность рассчитать максимально допустимую длину круглых лесоматериалов, которые могут использоваться при сплотке микроручков, т. е. длина пучка равна длине сплаваемых круглых лесоматериалов. В практических условиях расчетная длина круглых лесоматериалов может

быть больше длины круглых лесоматериалов, которые заготавливаются на лесосеке, т. к. длина сортиментов устанавливается потребителем. Данный фактор является существенным и должен учитываться при расчете.

Затраты на формирование из плоских сплочных единиц и из микропучков одной укрупненной лесотранспортной единицы обусловлены затратами на мероприятия по ее изготовлению. Если сплав круглых лесоматериалов осуществляется в плоских сплочных единицах вольницей, то в формировании укрупненных лесотранспортных единиц нет необходимости, т. к. плоские сплочные единицы имеют прямоугольную форму, что идеально для сплава вольницей, а увеличение ширины не влияет на осадку. В свою очередь, с ростом ширины микропучка из-за коэффициента формы будет увеличиваться и его осадка, а значит, для наилучшего выполнения сплава вольницей и для более эффективного использования пропускной способности сплавного хода рекомендуется [6] соединять микропучки между собой по несколько штук с помощью поперечных жестких связей, закрепленных за обвязки пачки. Причем, если при расчете объема микропучка в зависимости (10) берется длина сплочной единицы, определенная по выражению (13), то формирование из микропучков одной укрупненной лесотранспортной единицы не требуется, т. к. размеры микропучка будут максимально использовать габариты сплавного хода. Таким образом, затраты на соединение микропучков между собой, т. е. на изготовление укрупненных лесотранспортных единиц, складываются из затрат на выплату заработной платы, ГСМ, приобретение дополнительного сплочного такелажа и т. д.

Количество формирующихся укрупненных лесотранспортных единиц из плоских сплочных единиц будет равно 0, т. к. нет необходимости их укрупнять. В свою очередь, количество формирующихся укрупненных лесотранспортных единиц из микропучков рассчитывается по выражению

$$n_{\text{ФПМП}} = \frac{n_{\text{СПМП}}}{n_{\text{КПМП}}}, \quad (14)$$

где $n_{\text{КПМП}}$ – количество микропучков в одной укрупненной лесотранспортной единице, шт.

После определения количества микропучков в одной укрупненной лесотранспортной единице, полученное значение $n_{\text{ФПМП}}$ надо округлить до целого в большую сторону.

Из выражения (14) количество микропучков в одной укрупненной лесотранспортной единице

$$n_{\text{КПМП}} = \sqrt{\frac{(b_{\text{ЛХ}} - C)^2 - L_{\text{ПМП}}^2}{B_{\text{ПМП}}^2}}. \quad (15)$$

Полученное значение округляется до целого в меньшую сторону для обеспечения безаварийного сплава данных лесотранспортных единиц в лимитирующем створе сплавного хода. Равенства (14) и (15) справедливы при условии, что длина микропучка совпадает с длиной сплаваемых круглых лесоматериалов.

Сплав плоских сплочных единиц и микропучков вольницей может осуществляться следующими способами: пикетно-конвейерным и дистанцион-

но-патрульным [6, 8]. Затраты на сплав вольницей плоских сплотовых единиц и микропучков зависят от пропускной способности сплавного пути на первоначальном сплаве.

Если сплав плоских сплотовых единиц и микропучков планируется осуществить единым способом при условии, что из микропучков образованы укрупненные лесотранспортные единицы, то затраты на сплав вольницей плоских сплотовых единиц и микропучков, включающие затраты на заработную плату, ГСМ, проведение дноуглубительных работ, установку направляющих сооружений (бонов) и т. д. будут равны между собой.

Если микропучки сплавливаются самосплавом без образования укрупненных лесотранспортных единиц, то, как показывает практика [6, 8], сплав усложнен, особенно на крутых поворотах. Общие затраты в этом случае будут увеличиваться согласно привлечению дополнительных средств на организацию сплава.

Затраты на формирование одного плота из плоских сплотовых единиц и одного плота из микропучков будут различны из-за особенностей самих сплотовых единиц. При формировании плотов из плоских сплотовых единиц, предназначенных для первоначального сплава, ширина плота будет равна ширине одной плоской сплотовой единицы (т. к. при увеличении ширины сплотовой единицы ее осадка может оставаться на заданном уровне), а его длина – длине ряда из плоских сплотовых единиц. При формировании плота из микропучков с увеличением его ширины осадка увеличивается. Для более эффективного использования пропускной способности сплавного хода необходима установка в плоту поперечных рядов микропучков, т. е. ширина плота будет равна ширине нескольких микропучков, а длина – длине поперечных рядов сплотовых единиц. Следовательно, $Z_{\text{ППСЕ}} < Z_{\text{ПМП}}$ из-за дополнительных затрат, которые приходится на проведение работ по соединению между собой поперечных рядов микропучков в плоту и привлечение дополнительного формировочного такелажа.

Необходимое для буксировки плоских сплотовых единиц и микропучков количество плотов рассчитывается соответственно по формулам:

$$n_{\text{ППСЕ}} = \frac{n_{\text{ОПСЕ}}}{n_{\text{ПСЕП}}}; \quad (16)$$

$$n_{\text{ПМП}} = \frac{n_{\text{ОПМП}}}{n_{\text{ПМПП}}}, \quad (17)$$

где $n_{\text{ОПСЕ}}$, $n_{\text{ОПМП}}$ – общее количество плоских сплотовых единиц и пачек (микропучков) соответственно, изготавливаемых при транспортировке их в составе плота, шт.; $n_{\text{ПСЕП}}$, $n_{\text{ПМПП}}$ – количество плоских сплотовых единиц и микропучков соответственно, входящих в состав одного плота, шт.

Результаты расчета округляются до целого значения в большую сторону.

Общее количество плоских сплотовых единиц и микропучков, изготавливаемых при их транспортировке в составе плота, определяется соответственно по формулам:

$$n_{\text{ОПСЕ}} = \frac{W_{\text{ГПСЕП}}}{V_{\text{ПСЕП}}}; \quad (18)$$

$$n_{\text{ОПМП}} = \frac{W_{\text{ГПМПП}}}{V_{\text{ПМПП}}}, \quad (19)$$

где $W_{\text{ГПСЕП}}$, $W_{\text{ГПМПП}}$ – максимальный годовой объем сплава лесоматериалов в плотях из плоских сплотовых единиц и микропучков соответственно на первоначальном сплаве, м³; $V_{\text{ПСЕП}}$, $V_{\text{ПМПП}}$ – объем плоской сплотовой единицы и микропучка соответственно при транспортировке в составе плота, м³·т. Расчетные показатели округляются до целого значения в большую сторону.

$W_{\text{ГПСЕП}}$, $W_{\text{ГПМПП}}$ рассчитываются следующим образом:

$$W_{\text{ГПСЕП}} = N_{\text{ПСЕП}} \frac{t_{\text{ч}} n_{\text{ПСЕП}} V_{\text{ПСЕП}}}{t_{\text{ИСЕ}}}, \quad (20)$$

$$W_{\text{ГПМПП}} = N_{\text{ПСЕП}} \frac{t_{\text{ч}} n_{\text{ПМПП}} V_{\text{ПМПП}}}{t_{\text{ИСЕ}}}, \quad (21)$$

где $N_{\text{ПСЕП}}$ – планируемое количество смен в навигацию, при которых будет осуществляться сплав плоских сплотовых единиц в плотях, шт.; $t_{\text{ИСЕ}}$ – интервал времени между плывущими плотями, ч.

При плотовом сплаве $t_{\text{ИСЕ}}$ колеблется от 1 до 2 ч [6, 8], но устанавливается лесосплавной организацией.

Объем плоской сплотовой единицы при транспортировке в составе плота

$$V_{\text{ПСЕП}} = L_{\text{ПСЕП}} B_{\text{ПСЕП}} H_{\text{ПСЕП}} K_{\text{ПСЕП}}, \quad (22)$$

где $L_{\text{ПСЕП}}$, $B_{\text{ПСЕП}}$, $H_{\text{ПСЕП}}$ – соответственно длина, ширина и высота плоской сплотовой единицы для плотового сплава, м.

В зависимости (22) длина плоской сплотовой единицы для плотового сплава будет равна длине сплавляемых круглых лесоматериалов; высота определяется из равенства (8), а осадка – из (9); ширина, равная ширине плота, устанавливается согласно требованиям безопасной буксировки плота по водному пути с лимитирующими габаритами сплавного хода [9], т. е.

$$B_{\text{ПСЕП}} = \frac{b_{\text{ЛХ}}}{1,5}. \quad (23)$$

Ширина плоских сплотовых единиц, и в частности плота, может быть увеличена при оснащении его эффективными средствами управления.

Объем микропучка при транспортировке в составе плота рассчитывается по формуле

$$V_{\text{ПМПП}} = 0,785 L_{\text{ПМПП}} B_{\text{ПМПП}} H_{\text{ПМПП}} K_{\text{ПМПП}}, \quad (24)$$

где $L_{\text{ПМПП}}$, $B_{\text{ПМПП}}$, $H_{\text{ПМПП}}$ – длина, ширина и высота микропучка для плотового сплава соответственно, м.

Длина микропучка для плотового сплава равна длине сплавляемых круглых лесоматериалов, а высота определяется по зависимости (11), которая справедлива для данных условий. На практике при сплаве микропучков в составе плота коэффициент формы рекомендуется принимать от 2,0 до 3,0 [6, 8], следовательно, ширина микропучка для плотового сплава определяется следующим образом:

$$B_{\text{ПМПП}} = 2...3 H_{\text{ПМПП}}. \quad (25)$$

Количество плоских сплоточных единиц и микропучков, входящих в состав одного плота, определяется по формулам:

$$n_{\text{ПСЕП}} = \frac{L_{\text{П}} - l_{\text{ПР}} n_{\text{ПР}}}{L_{\text{ПСЕП}}}; \quad (26)$$

$$n_{\text{ПМПП}} = m_{\text{ПДП}} m_{\text{ПШП}}, \quad (27)$$

где $L_{\text{П}}$ – расчетная длина плота, м; $l_{\text{ПР}}$ – длина интервала между поперечными рядами в плоту, м; $n_{\text{ПР}}$ – количество интервалов между поперечными рядами в плоту, шт.; $m_{\text{ПДП}}$, $m_{\text{ПШП}}$ – количество микропучков, устанавливаемых по длине и ширине плота соответственно, шт.

При расчете количества плоских сплоточных единиц, входящих в состав одного плота, по зависимости (26) необходимо полученное значение округлить до целого в меньшую сторону. Данное условие принимается для обеспечения прочности и лучшей управляемости плота при буксировке по рекам с малыми глубинами.

Количество микропучков, устанавливаемых по длине плота, равно

$$m_{\text{ПДП}} = \frac{L_{\text{П}} - l_{\text{ПР}} n_{\text{ПР}}}{L_{\text{ПМПП}}}. \quad (28)$$

При этом формула для определения количества микропучков по ширине плота будет иметь следующий вид:

$$m_{\text{ПШП}} = \frac{b_{\text{ЛХ}}}{1,5B_{\text{ПМПП}}}. \quad (29)$$

Полученные расчетным путем показатели из зависимостей (28) и (29) округляются в меньшую сторону до целого значения в целях обеспечения прочности и лучшей управляемости плота при буксировке по рекам с малыми глубинами, особенно на криволинейных участках.

Длина плота для буксировки плоских сплоточных единиц и микропучков с учетом радиуса кривизны сплавного хода находится по известной формуле [6, 8]:

$$L_{\text{П}} = \frac{R_{\text{ЛХ}}}{5 \dots 6}, \quad (30)$$

где $R_{\text{ЛХ}}$ – радиус кривизны сплавного хода, м.

Зависимость (30) справедлива для плотов, используемых на водных путях с большим радиусом кривизны сплавного хода. При сильном извилистом русле расчет длины плота необходимо осуществлять по методикам, описанным в источнике [9].

Затраты на буксировку одного плота из плоских сплоточных единиц и плота из микропучков включают в себя затраты на подготовку плота к буксировке, ГСМ, заработную плату и т. д. При этом буксировка плотов осуществляется до переформировочного рейда, где они укрупняются и затем буксируются на рейд приплава.

В неравенстве (1) количество плотов из плоских сплоточных единиц и из микропучков, планируемых для буксировки, будет соответственно равно количеству плотов, изготавливаемых для буксировки плоских сплоточных единиц и микропучков, т. е. $n_{\text{БПСЕ}} = n_{\text{ППСЕ}}$, а $n_{\text{БМПП}} = n_{\text{ПМПП}}$.

Сплав плоских сплоточных единиц и микропучков вольницей, а также в составе плота требует приобретения новых усовершенствованных машин и оборудования для выполнения операций, связанных с транспортировкой круглых лесоматериалов, изготовлением лесотранспортных единиц и их перевозкой, спуском на воду, формированием плотов и т. д. В практических условиях затраты на закупку машин и оборудования для организации сплава лесоматериалов в микропучках будут иметь минимальные значения, т. к. микропучки характеризуются простотой изготовления, при их сплотке и транспортировке могут применяться машины и оборудование, используемые для выполнения других видов работ [6, 8, 11]. Технология сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах требует больших затрат на приобретение машин и оборудования. Это связано с тем, что технология сплава лесоматериалов на базе плоских сплоточных единиц проработана не в полной мере: отсутствуют или малоэффективны машины и оборудование, выполняющие различные виды операций. Таким образом, требуется совершенствование транспортировки плоских сплоточных единиц, а также машин и оборудования для их сборки и разборки [4].

Неравенство (1) включает такие показатели, как сроки полезного использования машин и оборудования, приобретенных для сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах и в микропучках. Данные показатели обозначают количество лет, на протяжении которых будут пригодны для эксплуатации машины и оборудование. Для объективного анализа эффективности использования плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве $t_{\text{СПМП}} = t_{\text{СПСЕ}}$. Следует отметить, что в случае применения неравенства (1), согласно методикам экономических расчетов $t_{\text{СПМП}} = t_{\text{СПСЕ}} > 1$ год.

Затраты на вывозку сухопутным транспортом лесоматериалов, остающихся от заготовленной за год древесины из-за закрытия навигации и ограничения объема сплава ее в плоских сплоточных единицах, определяются следующим образом:

$$Z_{\text{СПСЕ}} = (W_{\text{ГОЗ}} - W_{\text{ТПСЕ}} - W_{\text{ТПСЕП}}) S_{\text{АЖ}} \Pi_{\text{АЖ}}, \quad (31)$$

где $W_{\text{ГОЗ}}$ – годовой объем заготовки древесины на лесосеках, примыкающих к водному пути, м³; $S_{\text{АЖ}}$ – протяженность транспортировки лесоматериалов по автомобильным и железнодорожным путям взамен водного пути, км; $\Pi_{\text{АЖ}}$ – затраты на транспортировку 1 м³ лесоматериалов на 1 км по автомобильным и железнодорожным путям, тыс. р./м³км.

В свою очередь затраты на вывозку сухопутным транспортом лесоматериалов, которые остаются от заготовленной за год древесины из-за закрытия навигации и ограничения объема ее сплава в микропучках, рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{СПМП}} = (W_{\text{ГОЗ}} - W_{\text{ТПМП}} - W_{\text{ТПМПП}}) S_{\text{АЖ}} \Pi_{\text{АЖ}}. \quad (32)$$

В выражениях (31) и (32) протяженность транспортировки лесоматериалов по автомобильным и железнодорожным путям равна расстоянию от мест заготовки до сплотно-формировочного рейда, установленного на реках с габаритами сплавного хода, позволяющими формировать лесотранспортные единицы с большими размерами. При определенных обстоятельствах $S_{\text{АЖ}}$ будет совпадать расстоянием от мест заготовки до пункта потребления.

Зависимость (31) принимается в расчетах, когда выполняется следующее условие:

$$W_{ГОЗ} \geq W_{ГПСЕ} + W_{ГПСЕП}. \quad (33)$$

В свою очередь, зависимость (32) используется в том случае, когда

$$W_{ГОЗ} \geq W_{ГПМП} + W_{ГПМПП}. \quad (34)$$

При невыполнении условий (33) и (34) в неравенстве (1) $Z_{СПСЕ}$ и $Z_{СПМП}$ во внимание не берутся. При этом, например, $W_{ГПСЕП}$ и $W_{ГПМПП}$ определяются соответственно:

$$W_{ГПСЕП} = W_{ГОЗ} - W_{ГПСЕ}; \quad (35)$$

$$W_{ГПМПП} = W_{ГОЗ} - W_{ГПМП}. \quad (36)$$

Из равенств (35) и (36) при необходимости можно также выразить $W_{ГПСЕ}$, $W_{ГПМП}$.

Если равенство (1) выполняется, то представим его левую часть как общие затраты от внедрения плоских сплоточных единиц на первоначальный сплав древесины $Z_{ОЗПСЕ}$, а правую часть – как общие затраты при сплаве древесины в микропучках $Z_{ОЗМП}$, тогда годовой экономический эффект $\Delta\mathcal{E}_{ПСЕ}$ от использования плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве древесины будет рассчитываться следующим образом:

$$\Delta\mathcal{E}_{ПСЕ} = Z_{ОЗМП} - Z_{ОЗПСЕ}. \quad (37)$$

Необходимо отметить, что при расчете годового экономического эффекта по формуле (37) его составляющие $Z_{ОЗМП}$ и $Z_{ОЗПСЕ}$ определяются с учетом неравенства (1), зависимостей (2)–(32) и условий (33)–(34).

При сплаве плоских сплоточных единиц и микропучков вольницей на расстоянии 500 км по водному объекту, имеющему минимальные габариты сплавного хода $h_{ЛХ} = 1$ м, $b_{ЛХ} = 10$ м, годовой экономический эффект от использования плоских сплоточных единиц вместо микропучков составит 104 472,2 тыс. р. Данный эффект присутствует, когда $Z_{СПМП} = 5$ тыс. р., $Z_{СПСЕ} = 19,845$ тыс. р., $N_{ПССЕ} = 100$ шт., $t_{ЧС} = 8$ ч, $t_{ИСЕ} = 0,2$ ч, $S_{АЖ} = 500$ км, $\Pi_{АЖ} = 0,00513$ тыс. р./км, $\rho_{д} = 700$ кг/м³, $W_{ГОЗ} = 150\,000$ м³, $n_{ФПСЕ} = n_{ФПМП} = 0$, $Z_{МПСЕ} = Z_{МПМП}$, $t_{СПСЕ} = t_{СПМП}$, $Z_{ТПСЕ} = Z_{ТПМП}$. Также следует отметить, что длина круглых лесоматериалов в плоских сплоточных единицах принималась равной 6 м, а длина круглых лесоматериалов в пакетах рассчитывалась по формуле (13).

В случае транспортировки плоских сплоточных единиц и микропучков в плотях тягой буксировщика годовой экономический эффект от использования плоских сплоточных единиц по отношению к микропучкам будет равен 28 780,8 тыс. р. Расчет годового экономического эффекта от использования плоских сплоточных единиц осуществлялся при следующих условиях: $h_{ЛХ} = 1$ м, $b_{ЛХ} = 10$ м, $Z_{СПМП} = 5$ тыс. р., $Z_{СПСЕ} = 19,845$ тыс. р., $N_{ПССЕ} = 150$ шт., $t_{ЧС} = 8$ ч, $t_{ИСЕ} = 8$ ч, $S_{АЖ} = 500$ км, $\Pi_{АЖ} = 0,00513$ тыс. р./км, $\rho_{д} = 700$ кг/м³, $W_{ГОЗ} = 100\,000$ м³, $Z_{ПССЕ} = Z_{ППМП}$, $n_{ПССЕ} = n_{ППМП}$, $Z_{БПСЕ} = Z_{БПМП}$, $n_{БПСЕ} = n_{БПМП}$, $Z_{МПСЕ} = Z_{МПМП}$, $t_{СПСЕ} = t_{СПМП}$. Длина круглых лесоматериалов в плоских сплоточных единицах и микропучках принималась 6 м. В плоту из плоских сплоточных единиц устанавливалось 6 шт. сплоточных единиц, а в плоту из микропучков – 12 шт. Количество плоских сплоточных единиц и микропучков в плотях было определено расчетным путем.

Заключение

Выполнение неравенства (1) будет свидетельствовать о том, что использование плоских сплотовых единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов является экономически выгодным и снижает затраты на транспортировку древесины от места заготовки до пункта потребления.

Внедрение плоских сплотовых единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов должно обеспечить более высокую пропускную способность сплавного пути по сравнению с использованием микропучков за счет уменьшения осадки, а следовательно, объема лесоматериалов, доставляемых на рейды дорогостоящим сухопутным транспортом.

При сплаве плоских сплотовых единиц и микропучков вольницей на расстояние 500 км по водному пути, имеющему минимальные габариты сплавного хода: глубину = 1 м и ширину = 10 м, – годовой экономический эффект от использования плоских сплотовых единиц вместо микропучков составит 104 472,2 тыс. р. при годовом объеме сплава лесоматериалов 150 тыс. м³. В случае транспортировки плоских сплотовых единиц и микропучков в плотах тягой буксировщика – 28 780,8 тыс. р. при годовом объеме сплава лесоматериалов 100 тыс. м³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беленов И.А., Дмитриев Ю.Я., Патыкин В.И., Сербский В.К. Основы проектирования лесосплавных объектов. М.: Экология, 1992. 128 с. Belenov I.A., Dmitriyev Yu.Ya., Patyakin V.I., Serbskiy V.K. *Fundamentals of Design of Timber-Rafting Objects*. Moscow, Ekologiya Publ., 1992. 128 p.
2. Васильев В.В. Транспортно-технологические схемы для поставки лесоматериалов различным видом транспорта // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-2(8-2). С. 47–50. Vasiliev V.V. Transport and Technological Schemes for Supply of Forest Products by Transport's Various Type. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, vol. 2, no. 3-2(8-2), pp. 47–50.
3. Васильев В.В. Бесперевалочная транспортировка древесины различными видами транспорта // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4(8-4). С. 182–186. Vasiliev V.V. Beperevalochny Transportation of Wood by Various Type of Transport. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, vol. 2, no. 3-4(8-4), pp. 182–186.
4. Васильев В.В., Аксенов И.И. Анализ конструкций перспективных плоских сплотовых единиц // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для АПК: сб. науч. докл. XX Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов: Студия печати Галины Золотовой, 2019. С. 188–191. Vasiliev V.V., Aksenov I.I. Analysis of Structures of Perspective Flat Rafting Units. *Improving the Efficiency of Resource Use in Agricultural Production – New Technologies and Equipment of a New Generation for the Agro-Industrial Complex: Collection of Academic Papers of the XX International Scientific and Practical Conference*. Tambov, Studiya pechati Galiny Zolotovoy Publ., 2019, pp. 188–191.

5. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов. Saarbrucken (Германия): LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 284 с. Vasiliev V.V., Afonichev D.N. *Improved Timber Rafting Systems*. Saarbrucken, Germany, LAP, 2014. 284 p.

6. Водный транспорт леса: справ. / сост. Е.Н. Гаврилова, А.А. Гоник, И.П. Донской, Г.А. Жуков, М.П. Лазарев, С.И. Нефедов, Я.П. Петров, В.В. Савельев, С.С. Филимонов, Г.Ф. Шульц. М.: Гослесбумиздат, 1963. 560 с. *Water Transport of the Forest: Handbook*. Content by E.N. Gavrilova, A.A. Gonik, I.P. Donskoy, G.A. Zhukov, M.P. Lazarev, S.I. Nefedov, Ya.P. Petrov, V.V. Savel'yev, S.S. Filimonov, G.F. Shul'ts. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 560 p.

7. Войтко П.Ф., Царев Е.М., Гайсин И.Г., Рощина М.М. Обоснование конструкции плоской сплотовой единицы для первоначального лесосплава // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 6. С. 88–94. Voitko P.F., Tsarev E.M., Gaisin I.G., Roshchina M.M. Feasibility of Construction Flat Raft Section for Initial Wood Floating. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2018, vol. 22, no. 6, pp. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-6-88-94>

8. Донской И.П., Савельев В.В. Водный транспорт леса. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 288 с. Donskoy I.P. *Water Transport of the Forest*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 288 p.

9. Куколевский Г.А., Зайцев А.А. Первоначальный плотовой лесосплав. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 88 с. Kukolevskiy G.A., Zaytsev A.A. *Initial Timber Rafting*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 88 p.

10. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение. Архангельск: АГТУ, 2007. 492 с. Mitrofanov A.A. *Forest Rafting. New Technologies, Scientific and Technical Support*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 492 p.

11. Посыпанов С.В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 1. С. 141–153. Posypanov S.V. Numerical Determination of the Geometric Parameters of a Transport Floating Roundwood Bundle. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 141–153. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.141>

12. Посыпанов С.В. Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплотовой единицы, расположенной на твердом основании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 135–147. Posypanov S.V. Dimensional Determination of a Two-Storeyed Package Rafting Unit Placed on a Solid Basement. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 135–147. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.135>

13. Akay A.E., Sessions J. Applying the Decision Support System, TRACER, to Forest Road Design. *Western Journal of Applied Forestry*, 2005, vol. 20, iss. 3, pp. 184–191. DOI: <https://doi.org/10.1093/wjaf/20.3.184>

14. Andoh T., Andoh H. *Metal Ring for Fastening Parts by Means of Ocean Wave Force*. Patent US no. US 3662413 A, 1972.

15. Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 35–45.

16. Himislioglu S., Ađar E. Use of Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix. *Materials Letters*, 2004, vol. 58, iss. 3-4, pp. 267–271. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0)

17. Merzlyakov V.P. Physical and Mechanical Conditions for Primary Frost Crack Formation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, vol. 53, iss. 4, pp. 221–225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9389-1>

18. Skrypnikov A., Dorokhin S., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of the Statistical Identification of Car Transport Informational Provision. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 511–515.
19. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical Foundations of the Method of Designing a Clothoid Track with Approximation of Succession of Points. Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. Ed. by E. Popkova, V. Ostrovskaya. Cham, Springer, 2019, pp. 654–657. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90835-9_76
20. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical Background of Road Landscape Zoning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 659, no. 1, art. 012011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012011>
21. Syuneev V., Sokolov A., Konovalov A., Katarov V., Seliverstov A., Gerasimov Yu., Karvinen S., Välkky E. Comparison of Wood Harvesting Methods in the Republic of Karelia. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 120*. Vantaa, Finland, MELTA, 2009. 117 p.
22. Yin S. *Development of Recycled Polypropylene Plastic Fibres to Reinforce Concrete*. PhD Thesis. Singapore, Springer, 2017. 137 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3719-1>
23. Yukawa Sh. *Method for Transporting Timbers by Sea*. Patent US no. US 3450279 A, 1969.

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-143-154

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БАЛЛАСТНЫХ ЕМКостей МОБИЛЬНОГО ПРИЧАЛА ДЛЯ ПЕРЕВАЛКИ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

С.В. Посыпанов, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [ABF-6542-2021](#),

ORCID: [0000-0003-0600-7089](#)

В.О. Чупраков, аспирант; *ResearcherID:* [ABF-4113-2021](#),

ORCID: [0000-0002-4265-2555](#)

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: s.posypanov@narfu.ru, slav.tchupr@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 12.12.20 / Принята к печати 19.02.21

Аннотация. Применение мобильного малогабаритного причала предложенной авторами ранее конструкции позволяет существенно расширить возможности и снизить затраты на перевалку лесоматериалов. При буксировке причала на существенные расстояния его балластные емкости пусты, что обеспечивает минимизацию осадки и сопротивления воды перемещению. У пункта выполнения работ выравнивающую балластную емкость заполняют водой до достижения горизонтальности верхней поверхности причала. В этом положении осуществляют его локальные перемещения в случае значительного изменения уровня воды в водоеме. Исходя из технологичности изготовления и минимизации объема выравнивающей емкости она сконструирована как отделенная вертикальной стенкой часть внутреннего пространства у кормы причала. В перестановочную балластную емкость заливают воду для погружения причала до опирания на спланированный береговой откос. Откачивают воду из нее для всплытия причала при его локальных перестановках. При этом не следует допускать существенного дифферента. Нижнюю точку продольного сечения перестановочной емкости предусмотрели на пересечении днища причала и вертикали, которая делит пополам ватерлинию при завершении выравнивания. Разработаны алгоритмы определения положения вертикальной стенки выравнивающей емкости, положения и формы стенок перестановочной емкости. Для условного причала единичных высоты и ширины установили расстояние указанной вертикальной стенки от нижней точки причала, координаты точек профилей левой криволинейной и правой стенок перестановочной емкости. По этим координатам получили эмпирические зависимости. По значениям вычисленных метацентрических высот убедились в обеспечении продольной и поперечной остойчивости причала во всех положениях. Экспериментальная проверка на физической модели причала подтвердила правильность результатов. Переход к нужным размерам продольного профиля от условных предполагается с сохранением пропорций.

Для цитирования: Посыпанов С.В., Чупраков В.О. Обоснование параметров балластных емкостей мобильного причала для перевалки лесоматериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 143–154. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-143-154

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, мобильный причал, судовые перевозки, погрузка лесоматериалов, балластные емкости.

JUSTIFICATION OF BALLAST TANK PARAMETERS OF A MOBILE BERTH FOR TIMBER TRANSSHIPMENT

Sergey V. Posypanov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Vyacheslav O. Chuprakov, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABF-4113-2021](https://orcid.org/0000-0002-4265-2555),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4265-2555>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnogo Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: s.posypanov@narfu.ru, slav.tchupr@yandex.ru

Original article / Received on December 12, 2020 / Accepted on February 19, 2021

Abstract. The use of a mobile small-sized berth, the design of which was proposed by the authors in the previous paper, significantly increases capacity and reduces the cost of timber transshipment. When towing the berth over large distances, its ballast tanks are empty, which ensures that draft and water resistance to movement are minimized. At the point of operation the leveling ballast tank is filled with water until the top surface of the berth is leveled. In this position, the berth is moved locally in case of significant changes of the water level in the reservoir. Due to manufacturability and minimization of the volume of the leveling tank, it is designed as a part of the inner space at the berth stern, separated by a vertical wall. The permutation ballast tank is filled with water to submerge the berth until it leans on the leveled coastal slope. Water is pumped out of the tank to make the berth float during its local permutations. In this case, a significant trim should not be allowed. The lower point of the longitudinal section of the permutation tank was provided at the intersection of the berth bottom and the vertical, which bisects the waterline upon completion of the alignment. Algorithms have been developed for determining the position of the vertical wall of the leveling tank and the position and shape of the walls of the permutation tank. The distance of the vertical wall from the lower point of the berth and the coordinates of the points of the profiles of the left curved and right walls of the permutation tank were determined for a conditional berth of unit height and width. The coordinates were used to derive empirical dependencies. The values of the calculated metacentric heights verified the longitudinal and transverse stability of the berth in all positions. Experimental validation on a physical model of the berth confirmed the correctness of the results. Transition to the correct dimensions of the longitudinal profile from the conditional is assumed with the proportions retained.

For citation: Posypanov S.V., Chuprakov V.O. Justification of Ballast Tank Parameters of a Mobile Berth for Timber Transshipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 143–154. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-143-154

Keywords: round timber, mobile berth, shipping, timber loading, ballast tanks.

Введение

Сотрудниками Северного (Арктического) федерального университета предложена конструкция мобильного малогабаритного причала, применение которой позволяет существенно расширить возможности и уменьшить затраты при осуществлении сброски сплочных единиц в воду [9], погрузке лесоматериалов на суда и других видах перевалки лесных грузов [4]. Сведения об указанной конструкции, технологиях применения причала, их преимуществах, об определении геометрических параметров его корпуса, гидродинамических характеристик приведены в работах [7, 8, 11, 12]. Внутри причала предусмотрены две балластные емкости, необходимые для его эффективного использо-

вания. Работ по обоснованию их параметров нет, в связи с чем сделан вывод о необходимости выполнения данной работы.

Цель исследования – обоснование геометрических характеристик выравнивающей и перестановочной балластных емкостей мобильного причала.

Объект – балластные емкости мобильного причала для перевалки лесоматериалов. *Метод* – теоретический с проверкой результатов на физической модели.

Результаты исследования и их обсуждение

При буксировке причала на существенные расстояния его балластные емкости пусты. Осадка причала и сопротивление воды его перемещению в этом случае минимальны, верхняя поверхность наклонена. У пункта выполнения работ причал приводят в положение, в котором осуществляется его перемещение при значительных изменениях уровня воды в водоеме. Для этого заполняют водой выравнивающую емкость до достижения горизонтальности верхней поверхности причала. Положение и форма этой емкости приняты исходя из технологичности ее изготовления и минимизации объема. При предварительных расчетах убедились, что вертикальная стенка данной емкости будет размещаться правее нижней точки корпуса причала (рис. 1).

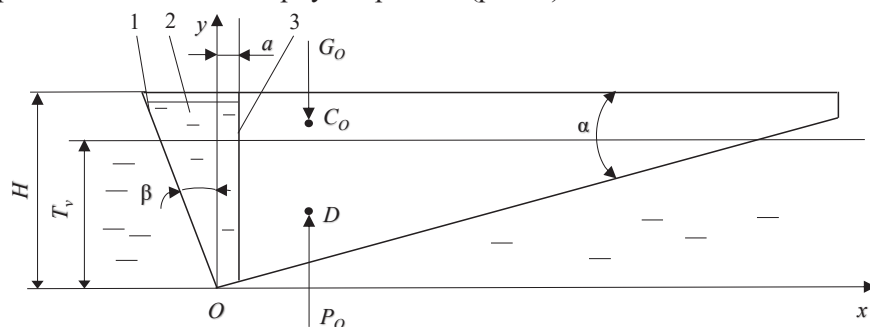


Рис. 1. Схема причала с заполненной выравнивающей емкостью: 1 – кормовая поверхность; 2 – выравнивающая емкость; 3 – вертикальная стенка емкости

Fig. 1. Scheme of the berth with the filled leveling tank: 1 – stern surface; 2 – leveling tank; 3 – tank vertical wall

Обосновывая параметры балластных емкостей, исходим из условия, что в рассматриваемом положении плавающего причала общий центр тяжести и центр водоизмещения лежат на вертикали, называемой осью плавания [16, 17]. Вместе с тем предполагается контроль устойчивости причала. Берем причал единичных ширины и высоты. При этом упрощаем математические выражения, чтобы в итоге легко пересчитать результаты под требуемые значения указанных параметров.

Формулы, позволяющие определять координаты центров тяжести и центров водоизмещения причала, получены с опорой на положения механики твердого тела [3, 19] и гидромеханики [1, 2]. В частности, для общего центра тяжести C_o выровненного причала (см. рис. 1) указанные формулы имеют вид

$$x_{co} = \frac{G_m x_m + G_{vl} x_{vl} + G_v x_v}{G_m + G_{vl} + G_v}; \quad (1)$$

$$y_{co} = \frac{G_m y_m + G_{vl} y_{vl} + G_v y_v}{G_m + G_{vl} + G_v}, \quad (2)$$

где G_m , G_{vl} , G_v – силы тяжести, соответствующие конструкциям причала, воде в емкости слева от оси Oy и справа от нее, Н; x_m , x_{vl} , x_v – абсциссы центров тяжести указанных составляющих, м; y_m , y_{vl} , y_v – ординаты обозначенных центров, м.

Для координат центра водоизмещения D причала в том же положении получены выражения:

$$x_D = T_v \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta}{3(\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)}; \quad (3)$$

$$y_D = \frac{2T_v}{3}, \quad (4)$$

где T_v – осадка причала после его выравнивания, м; α – угол между верхней и нижней поверхностями, рад; β – угол наклона кормовой поверхности, рад.

Абсциссы центров тяжести:

$$x_{vl} = -\frac{1}{3} K_2 H \operatorname{tg} \beta; \quad (5)$$

$$x_v = \frac{a(K_2 H - 2a \operatorname{tg} \alpha / 3)}{2K_2 H - a \operatorname{tg} \alpha}, \quad (6)$$

где K_2 – коэффициент, учитывающий обеспечение резерва при заполнении емкости водой; a – расстояние между осью Oy и вертикальной стенкой емкости, м.

Коэффициент K_2 приравняли к 0,95.

Полагая, что масса конструкций причала распределена по площади его продольного сечения в целом равномерно, получили

$$x_m = \frac{1,3(L_v - H \operatorname{tg} \beta)^2 - H^2 \operatorname{tg}^2 \beta}{3,45(L_v - H \operatorname{tg} \beta) + 3H \operatorname{tg} \beta}, \quad (7)$$

где L_v – длина ватерлинии в выровненном положении, м; H – высота причала, м.

G_m с некоторой перестраховкой установили через удельную металлоемкость аналогов m_y . В качестве аналогов из-за отсутствия подобных причалов приняты баржи-площадки [2, 5, 6, 10, 13]. Для них определили значения m_y , используя выражение

$$m_y = \frac{M_b}{V_k},$$

где M_b – масса баржи-площадки, тыс. кг; V_k – объем ее корпуса, м³.

Выполнив аппроксимацию результатов, получили

$$m_y = 0,021 V_{kn}^2 - 0,115 V_{kn} + 0,293,$$

где V_{kn} – объем корпуса причала, тыс. м³.

Коэффициент детерминации [15] для этого уравнения равен 0,87.

Согласно полученным данным m_y возрастает с уменьшением объема корпуса. Экстраполируя приведенную выше зависимость до малых объемов, соответствующих объемам корпусов причалов, приняли для них удельную металлоемкость 300 кг/м³.

Корпус условного причала при ранее обоснованных пропорциях имеет объем 1,838 м³. Масса при принятой удельной металлоемкости – 532 кг, тогда $G_m = 5410$ Н. Для такого причала

$$G_{vl} = 0,5\rho g K_1 K_2 \text{tg}\beta; \quad (8)$$

$$G_v = \rho g a K_1 (K_2 - 0,5 \text{atg}\alpha), \quad (9)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; K_1 – коэффициент, учитывающий присутствие внутри емкости элементов каркаса, K_1 приравнивали к 0,95.

Выражение для определения силы Архимеда в данном случае имеет вид

$$P_o = 0,5 T_v^2 \rho g (\text{tg}\beta + \text{ctg}\alpha).$$

Эта сила равна суммарной силе тяжести

$$G_o = G_m + G_{vl} + G_v. \quad (10)$$

Из условия равенства P_o и G_o (см. рис. 1) у плавающего причала

$$T_v = \sqrt{\frac{G_o}{0,5\rho g (\text{tg}\beta + \text{ctg}\alpha)}}. \quad (11)$$

Прямого аналитического решения у задачи нет. Величину a выразить из данной системы уравнений невозможно. Разработали алгоритм численного решения [14, 18] с использованием компьютера. В ходе вычислений по этому алгоритму с помощью (5), (7), (8) при единичной высоте определяются значения x_{vl} , x_m , G_{vk} , которые при принятых нами ранее входных величинах оказались равными 0,085 м, 1,030 м, 1127 Н. Напомним, что $G_m = 5410$ Н.

Последующие вычисления осуществляются в цикле. Величине a присваивается нулевое значение с увеличением его в каждом цикле на 0,005 м. При текущем a согласно (6), (9) вычисляются x_v , G_v . Затем с помощью (1) определяется x_{co} и в соответствии с (10), (11) – осадка T_v . По формуле (3) вычисляется x_D . В конце цикла находится разность x_{co} и x_D . Цикл повторяется, пока эта разность не окажется равной 0 или очень близкому к нему значению. Результаты расчетов заключительного цикла фиксируются.

Получили $a = 0,160$ м, $T_v = 0,656$ м, $x_D = 0,704$ м, $x_{co} = 0,705$ м.

Дальнейшие вычисления выполняют для оценки остойчивости выровненного причала:

$$y_{vl} = 2K_2 H / 3;$$

$$y_v = \frac{(K_2 H - \text{atg}\alpha)(0,5K_2 H + \text{atg}\alpha) + a^2 \text{tg}^2 \alpha / 3}{K_2 H - 0,5 \text{atg}\alpha};$$

$$y_m = \frac{H(2\text{tg}\beta + 1,859 \text{ctg}\alpha)}{3\text{tg}\beta + 2,933 \text{ctg}\alpha}.$$

При единичной высоте $y_{vl} = 0,633$ м, $y_v = 0,509$ м, $y_m = 0,661$ м. Согласно (2) и (4), $y_{co} = 0,630$ м, $y_D = 0,437$ м.

Для метацентрической высоты [17] выровненного причала по дифференту получено выражение

$$h_{m1} = \frac{L_v^3}{6T_v^2 (\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta)} - 0,193H,$$

по крену

$$h_{m2} = \frac{L_v B^2}{6T_v^2 (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)} - 0,193H;$$

$$L_v = T_v (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{tg}\beta).$$

При единичных высоте и ширине $L_v = 2,464$ м, $h_{m1} = 1,349$ м, $h_{m1} = 0,223$ м. Метацентрические высоты положительны – причал устойчив даже при условной единичной ширине, которая фактически существенно больше.

Если фактическое значение m_y окажется меньше 300 кг/м^3 (превышать не рекомендовано), то для выравнивания причала при той же емкости потребуется меньше воды.

В перестановочную емкость заливают воду для погружения причала до опирания на спланированный береговой откос. Для всплытия причала при локальных перестановках в случаях существенного изменения уровня воды в водоеме откачивают воду. При этом не следует допускать существенного дифферента.

Наиболее рациональное расположение перестановочной емкости отражено на рис. 2. При очень небольшом наполнении этой емкости осадка причала возрастет на еще меньшую величину T_d (рис. 2). Равнодействующая приращения силы Архимеда P_d в случае бесконечно малого T_d лежит на вертикали, проходящей по середине ватерлинии причала. Дифферент не возникнет, если равнодействующая силы тяжести G_d воды, залитой в указанную емкость, будет находиться на одной линии с P_d . Учитывая изложенное, нижнюю точку профиля перестановочной емкости разместили на указанной линии у днища причала. Справа от этой линии донной частью емкости является обшивка корпуса причала, слева форму стенки емкости определили из условия отсутствия дифферента.

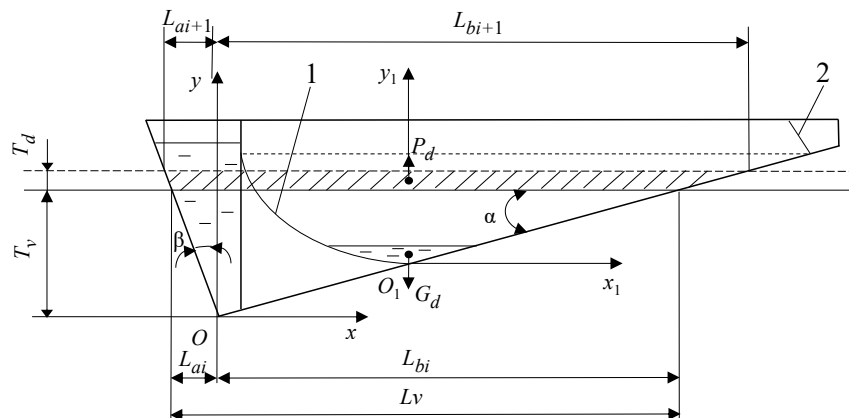


Рис. 2. Продольный профиль причала с перестановочной емкостью: 1 – криволинейная часть стенки перестановочной емкости; 2 – правая стенка перестановочной емкости

Fig. 2. Longitudinal profile of the berth with the permutation tank: 1 – curved part of the permutation tank wall; 2 – right wall of the permutation tank

Здесь целесообразно использовать систему координат $x_1O_1y_1$ (см. рис. 2). Ее связь с системой xOy осуществляется с помощью выражений:

$$x_{O_1} = 0,5L_v - T_v \operatorname{tg}\beta;$$

$$y_{O_1} = T_v - 0,5L_v \operatorname{tg}\alpha,$$

где x_{O_1}, y_{O_1} – координаты точки O_1 в системе xOy .

Для установления формы левой стенки перестановочной емкости разработали алгоритм численного решения задачи, реализовав его на компьютере. Алгоритм включает два цикла. Во внешнем из них уровень в перестановочной емкости увеличивается на $\Delta y_1 = 0,05H$, во внутреннем определяется положение точки профиля левой стенки при данном уровне, т. е. Δl_{i+1} (рис. 3).

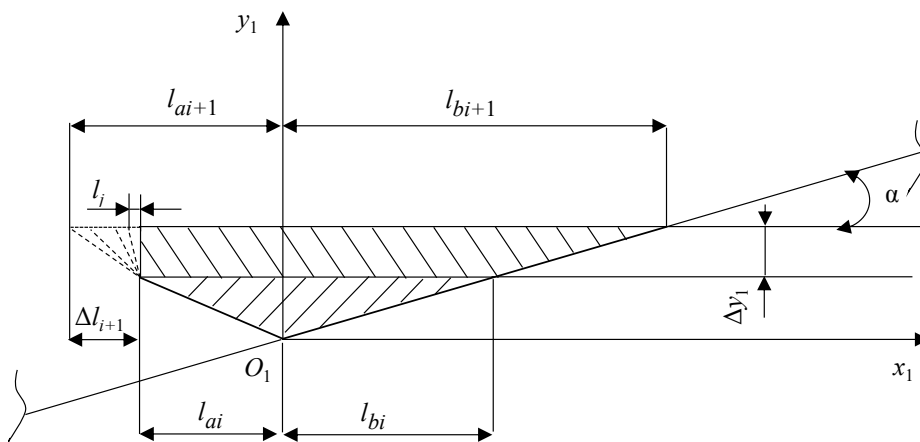


Рис. 3. Схема определения профиля криволинейной части стенки перестановочной емкости

Fig. 3. Scheme for determining the profile of the curved part of the permutation tank wall

При каждом прохождении внутреннего цикла Δl_{i+1} увеличивается на 0,001 м. Далее по приведенной ниже формуле определяется объем воды в данном слое высотой Δy_1 при текущем положении точки профиля левой стенки емкости:

$$V_{Ti} = 0,5\Delta y_1 K_1 (l_{ai} + l_{bi} + l_{ai+1} + l_{bi+1}),$$

где l_{ai}, l_{ai+1} – расстояния от оси O_1y_1 по горизонтали до точек профиля левой стенки емкости на предшествующем и данном уровнях; l_{bi}, l_{bi+1} – расстояния от оси O_1y_1 по горизонтали до правой стенки емкости на предшествующем и данном уровнях.

В первом цикле l_{ai}, l_{bi} равны 0, тогда

$$l_{bi+1} = l_{bi} + \Delta y_1 \operatorname{ctg}\alpha; \quad (12)$$

$$l_{ai+1} = l_{ai} + \Delta l_{i+1}. \quad (13)$$

Увеличение количества воды в емкости на V_{Ti} приводит к аналогичному увеличению водоизмещения причала. Это увеличение водоизмещения V_{di} связано с увеличением осадки причала выражением

$$W_{di} = L_{di} T_{di} + 0,5(\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) T_{di}^2, \quad (14)$$

где L_{di} – длина продольной ватерлинии причала при предшествующем заполнении перестановочной емкости, м; T_{di} – приращение осадки, м.

Расчет емкости начинается при $L_{di} = L_v$.

По выражению, полученному из (14), вычисляется приращение осадки

$$T_{di} = \frac{\sqrt{L_{di}^2 + 2W_{di}(\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta)} - L_{di}}{\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta}. \quad (15)$$

Далее определяются абсциссы центров, добавленных на шаге Δy_1 , водоизмещения и тяжести воды в емкости соответственно по формулам:

$$x_{di} = \frac{L_{bi}^2 + T_{di}(L_{bi} + T_{di}\text{ctg}\alpha/3)\text{ctg}\alpha - L_{ai}^2 - T_{di}(L_{ai} + T_{di}\text{tg}\beta/3)\text{tg}\beta}{2(L_{bi} + L_{ai}) + T_{di}(\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta)}; \quad (16)$$

$$x_{ci} = \frac{l_{bi}^2 + \Delta y_1(l_{bi} + \Delta y_1\text{ctg}\alpha/3)\text{ctg}\alpha - l_{ai}^2 - \Delta l_i(l_{ai} + \Delta l_{i+1}/3)}{2(l_{bi} + l_{ai}) + \Delta y_1\text{ctg}\alpha + \Delta l_i}, \quad (17)$$

где l_{ai} , l_{bi} – длины частей продольной ватерлинии соответственно по левую и правую сторону от оси Oy при предшествующем заполнении перестановочной емкости. В начале вычислений $L_{bi} = T_v\text{ctg}\alpha$, $L_{ai} = T_v\text{tg}\beta$.

Определяется разность x_{di} и x_{ci} . Цикл повторяется с увеличением Δl_{i+1} , пока эта разность не окажется равной 0 или очень близкой к нему. При этом условии осуществляется выход из внутреннего цикла. Фиксируются полученные при заключительном прохождении внутреннего цикла T_{di} , l_{bi+1} , l_{ai+1} , V_{Ti} , x_{ci} и x_{di} . Далее суммированием по нарастающей определяются общее приращение осадки T_d , осадка T_O как сумма T_d и T_v , высота наполнения y_{1i} и объем воды V_{TOi} в перестановочной емкости. Вычисляются L_{ai+1} , L_{bi+1} :

$$L_{ai+1} = T_O\text{tg}\beta;$$

$$L_{bi+1} = T_O\text{ctg}\alpha,$$

а также L_{di+1} как сумма этих величин. Для расчетов в следующих циклах величинам L_{ai} , L_{bi} , L_{di} , l_{ai} , l_{bi} присваиваются значения L_{ai+1} , L_{bi+1} , L_{di+1} , l_{ai+1} , l_{bi+1} соответственно.

По завершении внешнего цикла выполняются расчеты для контроля остойчивости причала. Для этого в системе xOy последовательно по формулам определяются ординаты центров тяжести верхнего слоя воды высотой Δy_1 , всей воды в перестановочной емкости и причала с водой в обеих емкостях:

$$y_{cvi} = y_{Oi} + y_{1i} + \frac{\Delta y_1(l_{ai} + l_{bi} + 2(l_{ai+1} + l_{bi+1} - l_{ai} - l_{bi})/3)}{l_{ai} + l_{ai+1} + l_{bi} + l_{bi+1}}; \quad (18)$$

$$y_{ocvi} = \frac{\sum y_{cvi} V_{Ti}}{V_{TOi}};$$

$$y_{covi} = \frac{G_O y_{co} + y_{ocvi} V_{TOi} \rho g}{G_O + V_{TOi} \rho g}.$$

По формуле (4) вычисляется ордината центра водоизмещения y_{Di} при текущей осадке T_O . Соответствующие метацентрические высоты по дифференту и по крену причала при условной единичной ширине находятся по выражениям:

$$h_{m1i} = \frac{L_{di}^3}{12(G_O/(\rho g) + V_{TOi})} - y_{covi} + y_{Di};$$

$$h_{m2i} = \frac{L_{di} B^2}{12(G_O/(\rho g) + V_{TOi})} - y_{covi} + y_{Di}.$$

Криволинейная часть профиля перестановочной емкости примыкает к вертикальной стенке соседней емкости (см. рис. 2). Условие, при котором происходит это примыкание, имеет вид

$$l_{a+1} = 0,5L_v - T_v \operatorname{tg}\beta - a.$$

Отсутствие дифферента при заполнении перестановочной емкости выше точки примыкания в связи с вертикальностью левой стенки обеспечивается благодаря соответствующему профилю правой (см. рис. 2). В алгоритм расчетов при этом вносятся несущественные изменения. В частности, вместо (13) используется равенство

$$l_{a+1} = l_{ai};$$

вместо (12) –

$$l_{bi+1} = l_{bi} - \Delta l_i;$$

вместо (17) –

$$x_{ci} = \frac{(l_{bi} - \Delta l_i)^2 + 2(l_{bi} - 2\Delta l_i/3) - l_{ai}^2}{2l_{bi} - \Delta l_i + 2l_{ai}};$$

вместо (18) –

$$y_{cvi} = y_{Oi} + y_{li} + \frac{\Delta y_1 (l_{ai+1} + l_{bi+1} + (l_{ai} + l_{bi} - l_{ai+1} - l_{bi+1})/3)}{l_{ai} + l_{ai+1} + l_{bi} + l_{bi+1}}.$$

Когда осадка T_O начинает превышать $0,85H$, подводная часть корпуса причала справа ограничивается вертикальной поверхностью. В связи с этим (14) заменяется выражением

$$W_{di} = L_{di} T_{di} + 0,5 \operatorname{tg}\beta T_{di}^2.$$

Соответственно, (15) – формулой

$$T_{di} = \frac{\sqrt{L_{di}^2 + 2W_{di} \operatorname{tg}\beta} - L_{di}}{\operatorname{tg}\beta},$$

а (16) –

$$x_{di} = \frac{L_{bi}^2 - L_{ai}^2 + T_{di} (L_{ai} - T_{di} \operatorname{tg}\beta/3) \operatorname{tg}\beta}{2(L_{bi} + L_{ai}) + T_{di} \operatorname{tg}\beta}.$$

Величина L_{bi} далее не меняется. Расчеты продолжаются до выполнения условия $T_O = H$, при котором верхняя поверхность причала оказывается на уровне забортной воды.

Выполнив расчеты, нашли координаты совокупности точек профиля левой криволинейной части и правой стенки перестановочной емкости. При этом учли, что l_{bi} , l_{ai} равны абсциссам соответствующих точек в системе $x_1 O_1 y_1$,

первое со знаком минус. По этим точкам в результате аппроксимации получили зависимости для криволинейной части левой стенки

$$y_1 = 0,292x_1^2 + 0,203x_1 + 0,04,$$

для правой стенки

$$y_1 = -5,937x_1 + 9,287.$$

Достоверность аппроксимации [20] для обоих выражений – 0,999.

Эти два уравнения и рис. 2 в полной мере характеризуют форму, размеры и положение перестановочной емкости.

Плавучесть причала сохраняется, пока уровень в перестановочной емкости не поднимется до $y_1 = 0,661H$, при этом приращение осадки к начальной после выравнивания составит $0,346H$.

Расчеты позволили установить, что при любой осадке выровненный причал сохраняет и продольную, и поперечную остойчивость при реальных соотношениях ширины, длины и высоты.

Продольный профиль балластных емкостей и корпуса причала, предложенный нами, является базовым. Изменение формы этого профиля считаем нецелесообразным. Переход от базовых размеров к нужным предполагается при сохранении пропорций. В случае необходимости их изменения можно обратиться к методике, описанной в статье.

Экспериментальная проверка на модели причала, изготовленной в масштабе 1:20, подтвердила правильность результатов, полученных теоретическим путем при обосновании геометрических параметров балластных емкостей причала.

Выводы

1. Положение и форму выравнивающей балластной емкости приняли исходя из технологичности ее изготовления и минимизации объема. Положение ее вертикальной стенки установили численным методом с помощью разработанного авторами алгоритма.

2. Предложили наиболее рациональный вариант расположения перестановочной емкости. Используя численный метод решения, с помощью разработанного авторами алгоритма обосновали ее основные геометрические параметры. Получили аппроксимирующие зависимости, описывающие форму и положение стенок перестановочной емкости.

3. В ходе выполнения расчетов убедились, что при любой осадке выровненный причал сохраняет и продольную, и поперечную остойчивость при реальных соотношениях ширины, длины и высоты.

4. Экспериментальная проверка на физической модели причала подтвердила правильность результатов, полученных теоретическим путем.

5. Разработанные материалы необходимы при проектировании мобильных причалов, применение которых позволяет существенно расширить возможности и снизить затраты при осуществлении перевалки лесных грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К.* Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 455 с. *Voytkunskiy Ya.I., Faddeyev Yu.I., Fedyayevskiy K.K.* *Hydromechanics.* Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1982. 455 p.

2. Войткунский Я.И., Иванов А.Н., Луговский В.В. и др. Справочник по теории корабля: В 3 т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1985. 764 с. Voytkunskiy Ya.I., Ivanov A.N., Lugovskiy V.V. et al. *Handbook of Ship Theory*: In 3 Vol. Vol. 1. Hydromechanics. Ship Motion Resistance. Ship Propulsion Systems. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1985. 764 p.

3. Голдстейн Г. Классическая механика. М.: Наука, 1975. 415 с. Goldstein H. *Classical Mechanics*. Translated from English. Moscow, Nauka Publ., 1975. 415 p.

4. Корпачев В.П. Теоретические основы водного транспорта леса. М.: Акад. естествознания, 2009. 236 с. Korpachev V.P. *Theoretical Foundations of Waterborne Transportation of Timber*. Moscow, Akademiya estestvoznaniya Publ., 2009. 236 p.

5. Лебедев Н.И. Лесосплавной флот. М.: МГУЛ, 2003. 205 с. Lebedev N.I. *Timber Rafting Fleet*. Moscow, MGUL Publ., 2003. 205 p.

6. Минаев А.Н., Беленов И.А., Козленков Н.И. Лесосплавной флот. М.: Экология, 1991. 272 с. Minayev A.N., Belenov I.A., Kozlenkov N.I. *Timber Rafting Fleet*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 272 p.

7. Посыпанов С.В. Технологические схемы погрузки лесоматериалов на суда с использованием мобильного малогабаритного причала // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2(13-2). С. 313–317. Posypanov S.V. Technological Schemes of Loading Timber on Ships with Use of the Mobile Small-Sized Berth. *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. 2-2(13-2), pp. 313–317.

8. Посыпанов С.В., Чупраков В.О. Применение мобильных малогабаритных причалов при выгрузке круглых лесоматериалов из воды // Аллея Науки. 2018. Т. 5, № 6(22). С. 285–288. Posypanov S.V., Chuprakov V.O. The Use of Mobile Small-Sized Berths for Unloading Round Timber out of Water. *Alleya nauki* [Alley-Science], 2018, vol. 5, no. 6(22), pp. 285–288.

9. Суров Г.Я., Зунин Л.Н. Организация береговой сплотки. Архангельск: АГТУ, 2006. 75 с. Surov G.Ya., Zunin L.N. *Organization of Coastal Rafting*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2006. 75 p.

10. Суров Г.Я., Барабанов В.А., Рымашевский В.Л. Перевозки лесных грузов в судах внутреннего плавания. Архангельск: САФУ, 2010. 208 с. Surov G.Ya., Barabanov V.A., Rymashevskiy V.L. *Timber Cargo Transportation in Inland Navigation Vessels*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 208 p.

11. Чупраков В.О., Посыпанов С.В. Результаты исследования взаимодействия мобильного малогабаритного причала с водной средой при его буксировке // Изв. СПбЛТА, 2020. Вып. 233. С. 152–165. Chuprakov V.O., Posypanov S.V. Research Findings of an Relocatable Small Size Pontoon Pier Interaction with the Aquatic Medium during Its Towing. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2020, is. 233, pp. 152–165. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.233.152-165>

12. Чупраков В.О., Посыпанов С.В. Обоснование геометрических параметров мобильного малогабаритного причала для перевалки лесных грузов // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика. Воронеж: ВГЛУТ им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 154–159. Chuprakov V.O., Posypanov S.V. Justification of Geometric Parameters of a Mobile Small-Sized Way for Transshipment of Timber Cargo. *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Modern Machines, Equipment and IT Solutions for Industrial Complex: Theory and Practice"*. Voronezh, VSUFT Publ., 2021, pp. 154–159. DOI: https://doi.org/10.34220/MMEITSIC2021_154-159

13. Якишаров П.С. Малые стальные суда. Л.: Судостроение, 1986. 168 с. Yaksharov P.S. *Small Steel Vessels*. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1986. 168 p.
14. Atkinson K.E. *An Introduction to Numerical Analysis*. New York, Wiley, 1989. 657 p.
15. Griffith A. *SPSS for Dummies*. Hoboken, NJ, Wiley, 2007. 360 p.
16. Kleinstreuer C. *Modern Fluid Dynamics*. Dordrecht, Springer, 2010. 620 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8670-0>
17. Larsson L., Stern F., Visonneau M. *Numerical Ship Hydrodynamics*. Dordrecht, Springer, 2014. 318 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7189-5>
18. Riley K.F., Hobson M.P., Bence S.J. *Mathematical Methods for Physics and Engineering*. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 1359 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810763>
19. Symon K.R. *Mechanics*. Addison-Wesley, 1971. 639 p.
20. Weisberg S. *Applied Linear Regression*. Hoboken, NJ, Wiley, 2005. 329 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471704091>



УДК 691+677

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-155-165

**PLYWOOD AND THERMAL INSULATION BOARDS
BASED ON THE MODIFIED PHENOL FORMALDEHYDE BINDER****Tatyana N. Vakhnina¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;**ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>**Aleksandr A. Fedotov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;**ResearcherID: [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>**Irina V. Susoeva¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;**ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>**Varvara E. Rumyantseva², Doctor of Engineering, Prof.;**ResearcherID: [W-4421-2017](https://orcid.org/0000-0001-7226-4580), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>¹Kostroma State University, ul. Dzerzhinskogo, 17, Kostroma, 156007, Russian Federation; e-mail: t_vakhnina@mail.ru, aafedotoff@yandex.ru, i.susoeva@yandex.ru²Ivanovo State Polytechnic University, Sheremetevskiy prosp., 21, Ivanovo, 155334, Russian Federation; e-mail: varyym@gmail.com

Original article / Received on September 15, 2021 / Accepted on November 11, 2021

Abstract. The lower curing temperature of phenol formaldehyde binder allows reducing the costs of producing cellulose-containing materials, such as FSF plywood and thermal insulation composites made of plant wastes. However, the low-temperature production mode provides an insufficient degree of the phenol formaldehyde binder curing, leading to a decrease in water resistance of material based on the phenol formaldehyde binder. A modifier should be added to the phenol formaldehyde binder to reduce the amount of free hydroxymethylol groups in the cured binder and to form a stronger cross-linked structure in low-temperature curing conditions. Hydrogen peroxide was used as a phenol formaldehyde binder modifier in this research. The research results confirmed the hypothesis about the effect of hydrogen peroxide on the intensification of the structure formation of cellulose-containing materials based on the phenol formaldehyde binder. In conditions of low-temperature curing (120 °C for FSF plywood and 100 °C for thermal insulation composites made of plant wastes) modification of phenol formaldehyde binder with hydrogen peroxide reduced the binder curing time, the pressing time of FSF plywood, improved the physical and mechanical properties of FSF plywood and thermal insulation composites made of cellulose-containing filler (soft wood waste and irrecoverable flax spinning waste). When 1.0 % of hydrogen peroxide is added to the binder, the binder curing time reduces by 43.6 %. The addition of 1.0 % of hydrogen peroxide increased the shear strength of FSF plywood by 4.4 % and the static bending strength of plywood by 4.8 %. Modification of the binder with hydrogen peroxide increased water resistance of FSF plywood: plywood thickness swelling has been reduced by 2 % over 24 h in water. The strength of thermal insulation composites made of cellulose-containing wastes increased by 5.2 % with the addition of 1.0 % of hydrogen peroxide, thickness swelling decreased by 4.9 % over 24 h. The obtained research results allow recommending a modifying additive of hydrogen peroxide to phenol formaldehyde binder in an amount of 1.0 % of resin

mass to increase the strength properties of FSF plywood and thermal insulation composites made of plant wastes.

For citation: Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Susoeva I.V., Rumyantseva V.E. Plywood and Thermal Insulation Boards Based on the Modified Phenol Formaldehyde Binder. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 155–165. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-155-165

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR and the Administration of the Kostroma region within the framework of the scientific project No. 19-43-440001.

Keywords: FSF plywood, phenol formaldehyde binder, hydrogen peroxide, physical and mechanical properties, thermal insulation boards, cellulose-containing waste, flax spinning waste.

ФАНЕРА И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЛИТЫ НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНОМ СВЯЗУЮЩЕМ

Т.Н. Вахнина¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

А.А. Федотов¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

И.В. Сусоева¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

В.Е. Румянцева², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [W-4421-2017](https://orcid.org/0000-0001-7226-4580),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>

¹Костромской государственный университет, ул. Дзержинского, д. 17, Кострома, Россия, 156007; e-mail: t_vachnina@mail.ru, aafedotoff@yandex.ru, i.susoeva@yandex.ru

²Ивановский государственный политехнический университет, просп. Шереметевский, д. 21, г. Иваново, Россия, 155334; e-mail: varrym@gmail.com

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 15.09.21 / Принята к печати 11.11.21

Аннотация. Снижение температуры отверждения фенолоформальдегидного связующего позволяет уменьшить затраты на производство целлюлозосодержащих материалов: фанеры ФСФ, теплоизоляционных плиточных композитов из растительных отходов. Однако низкотемпературный режим не обеспечивает достаточной степени отверждения фенолоформальдегидного связующего, это приводит к снижению водостойкости материала на основе данного компонента. В условиях низкотемпературного отверждения для уменьшения количества свободных гидроксиметильных групп в связующем и для формирования более прочно сшитой структуры необходимо введение в фенолоформальдегидное связующее модификатора. В качестве модификатора нами использован пероксид водорода. Результаты подтвердили гипотезу о его влиянии на процесс структурообразования целлюлозосодержащих материалов на фенолоформальдегидном связующем. Модификация фенолоформальдегидного связующего пероксидом водорода позволила в условиях низкотемпературного отверждения (120 °С для фанеры ФСФ, 100 °С для теплоизоляционных композитов из растительных отходов) уменьшить продолжительность отверждения фенольного связующего и прессования фанеры ФСФ, а также улучшить физико-механические показатели фанеры ФСФ и теплоизоляционных композитов из целлюлозосодержащего наполнителя – мягких

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

древесных отходов и невозвратных отходов прядения льна. При введении в связующее добавки 1,0 % H_2O_2 продолжительность отверждения снижается на 43,6 %; прочность фанеры ФСФ при скалывании увеличивается на 4,4 %, при статическом изгибе – на 4,8 %, разбухание по толщине за 24 ч пребывания в воде снижается на 2 %; прочность теплоизоляционных композитов из целлюлозосодержащих отходов увеличивается на 5,2 %, разбухание по толщине за 24 ч снижается на 4,9 %. Результаты исследования позволяют рекомендовать для повышения прочностных показателей фанеры ФСФ и теплоизоляционных композитов из растительных отходов модифицирующую добавку H_2O_2 к фенолоформальдегидному связующему в количестве 1,0 % от массы смолы.

Для цитирования: Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Susoeva I.V., Rummyantseva V.E. Plywood and Thermal Insulation Boards Based on the Modified Phenol Formaldehyde Binder // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 155–165. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-155-165

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 19-43-440001.

Ключевые слова: фанера ФСФ, фенолоформальдегидное связующее, пероксид водорода, физико-механические показатели, теплоизоляционные плиты, целлюлозосодержащие отходы, отходы прядения льна.

Introduction

Phenol formaldehyde binder (PFB) is often used for the production of composites based on cellulose-containing materials. This is due to the favorable combination of cost and performance [6]. Producers use low-temperature production modes to reduce the expenses for manufacturing cellulose-containing materials based on PFB. This leads to a decline in the physical and mechanical properties of the materials, thus, restricting their use in construction.

Studies on improvement of operational parameters of building materials, such as FSF plywood and composites based on plant fillers and phenol formaldehyde binder are urgent both in Russia and all over the world. Mohd Asim and colleagues believe that in order to improve the use of phenol formaldehyde binder and composites on its basis in construction it is necessary to apply composite modification [1].

The most actively used methods of modifying plant components of composites studied so far, according to both Russian and foreign scientists, involve a chemical reaction of the reagent with the hydroxyl groups of the cell wall polymer [2, 14]. These hydroxyl groups are crucial in the interaction between wood or other plant filler and water. They represent the most reactive sites. In wet wood, as in other cellulose-containing fillers, water molecules interact with cellulose forming hydrogen bonds between hydroxyl groups and individual water molecules. Changing the amount of these water molecules causes shrinkage and swelling of the plant material [14].

The research is aimed at providing rational values of production factors of materials based on phenol formaldehyde binder – FSF plywood and thermal insulation composites made of cellulose-containing fillers (soft wood waste and flax spinning waste).

Modification of plant-polymer composites, such as FSF plywood and thermal insulation boards made of plant filler, affects the mechanism of interaction between the cell wall polymer and water.

Russian and foreign scientists have used hydrochloride, sodium thiosulfate and sodium hydroxide in the form of ionic liquid [8], iron(III) chloride, phthalic anhydride

$C_8H_4O_3$ [20], tannins from bark [9, 17], hydrolysis lignin [10], hydrogen peroxide [4, 15], hydrogen peroxide together with photocatalysts (at the resin synthesis stage) [16], and rice straw alkali lignin [12] as PFB modifiers. Phthalic anhydride shows the properties of aromatic compounds and condenses with phenols. Natural tannins are a mixture of gallic and digallic acids both in free form and in combination with monosaccharides; furthermore, different number of gallic acid molecules can be attached to a saccharide molecule. This property of natural polyphenols provides additional bonds with the polysaccharides of veneer or plant filler of composite boards when modified with phenol formaldehyde binder. However, no significant improvement in the water resistance of materials based on phenol formaldehyde resins (PF resins) has been achieved so far by using natural polyphenols and modified lignin.

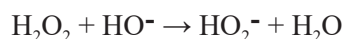
One of the promising areas for improving the properties of FSF plywood and other building composites based on plant fillers is the use of hydrogen peroxide (H_2O_2) as a modifier. In addition to the modification of the binder itself, surface modification of veneer with a 5.0 % solution of H_2O_2 is also known [22]. However, this method requires the introduction of additional technological operations.

Peroxides are complex substances containing molecules with the functional group ROOR with the divalent O-O ion. Organic peroxides tend to easily decompose to free radicals in the form of RO. This very property ensures that H_2O_2 reacts with the hydrogen group of wood cellulose and plant fibers.

High water resistance and mechanical strength are important for FSF plywood since it is used not only as an element of building structures, but also for shuttering, packaging production and car building. Hydrogen peroxide treatment improves the tribological properties of cellulose-containing materials [5].

It is known that the efficiency of H_2O_2 in oxidation reactions is determined by the concentration of its active decomposition products.

The mechanism of decomposition of H_2O_2 , among other factors, is most influenced by the pH of the reaction medium. The first stage of the conversion of H_2O_2 in an alkaline medium (conditions of resole phenol formaldehyde resin) is the formation of a nucleophilic reagent – a hydroperoxide anion [21]:



The authors suggest that hydroxyperoxide anions during heating and hot pressing of plywood bind the hydroxyl groups of phenolic nuclei and accelerate curing of phenol formaldehyde binder.

Hydroxyperoxide anions are highly reactive compounds and can act as ligands in interactions with metal ions – complexing agents. There are always Fe^{3+} ions in phenol formaldehyde resin. Their trace values are formed when using an iron-molybdenum catalyst in formaldehyde synthesis.

The L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine reported that chelated iron forms serve as catalysts for polymer formation from formaldehyde [13]. The interaction of chelate compounds “hydroxyperoxide anions– Fe^{3+} ” with phenol formaldehyde oligomer initiates a polycondensation reaction with a higher rate at a lower temperature.

The electron configuration of Fe^{3+} ions corresponds to $1s^22s^22p^63s^23p^63d^54s^0$. The 3s, 3p and 3d subshells are occupied by electrons, the 4 subshells are free.

The common 4s, 4p and 4d hybrid orbitals are formed by interaction with the HO_2^- ligands. The Fe^{3+} ion, having donated these orbitals to the ligands, forms six donor-acceptor bonds that form an octahedron, which is characterized by the highest particle packing density and low energy reserve. Thus, six ligands (hydroxyperoxide anions) bind to the iron ion.

The theoretical assumptions put forward have been verified experimentally in this paper.

Objects and methods of research

The paper studies the influence of H_2O_2 on the curing time of the PFB based on the SFG-3014 resin, the shear strength and thickness swelling of FSF plywood, the static bending strength and thickness swelling of thermal insulation boards made of cellulose-containing wastes and the PFB. The addition of the modifier varied from 0.5 to 1.5 % of the binder weight (with a 0.5 % step).

The curing time of the PFB was detected at a temperature of 150 °C [19].

Five-layer plywood was manufactured on the basis of peeled birch veneer with a nominal thickness of 1.5 mm (State Standard GOST 99–2016). The veneer was pre-dried to a humidity of 7.0 ± 1.0 %. After forming the package and applying the binder, hot pressing was carried out in a laboratory hydraulic press at a pressing temperature of 120 °C; pressing time – 5 min; specific pressing pressure – 1.6 MPa; binder consumption – 100 g/m². Manufactured plywood was cooled for 24 h and then cut into samples for testing.

Thermal insulation boards with an average density of 275 kg/m³ were manufactured using the wet processing technology of fiberboard. The filler consists of 25 % of soft wood waste and 75 % of irrecoverable flax spinning waste. Cellulose-containing (irrecoverable) finely dispersed industrial wastes are disposed by incineration or landfilling. Cell damage is observed in processing of plant fibers of wood and annual plant (flax, cotton, etc.) wastes. Photos of plant wastes presented in the fig. 1 and 2 were obtained in the course of studies using an MS 20.1 Microscope [18].

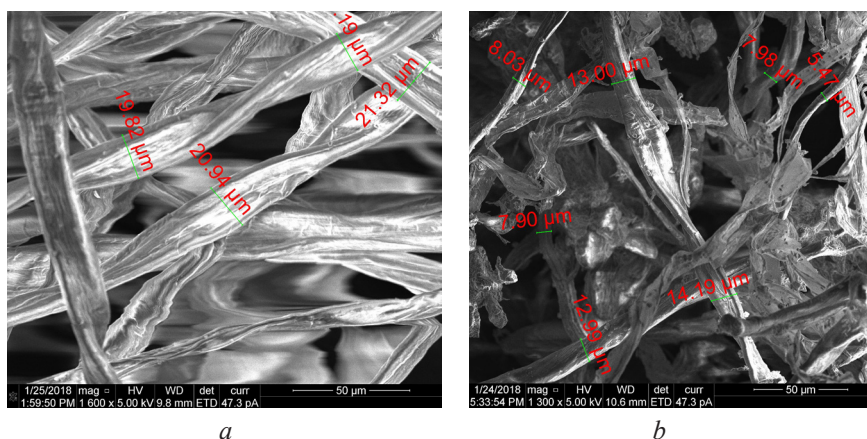


Fig. 1. Changes in the filler structure and dimensions during processing: *a* – cotton fibers; *b* – cotton processing waste fibers

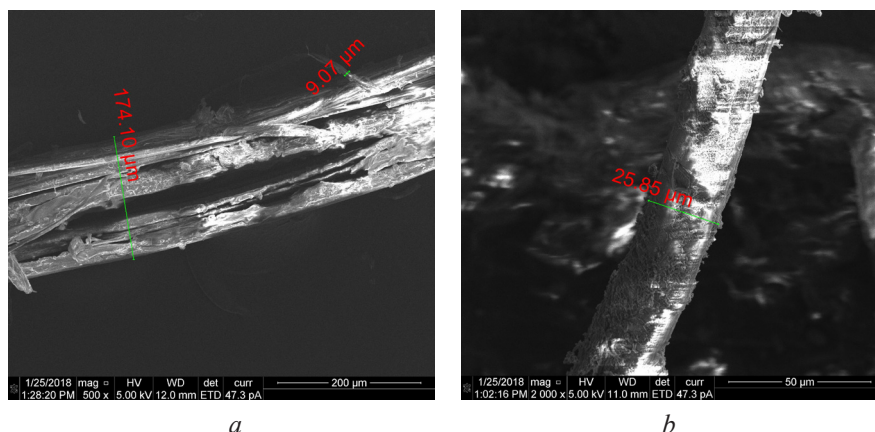


Fig. 2. Microstructure of flax processing waste: *a* – damaged fiber; *b* – fiber with the deposited binder

Samples of thermal insulation boards were dried at 100 °C to a humidity of 8 ± 1.0 %.

The number of duplicated experiments in the tests n was equal to 10. A testing machine 2166 P-5 (scale value 0.1 N) was used to determine the static bending strength and the shear strength along the glue seam of the samples. The variation coefficient of the mechanical properties of materials was no more than 1.5 % when testing plywood samples and 2.1 % when testing samples of thermal insulation boards. The scatter of values in different duplicated experiments is due to the manual method of forming the material before pressing for plywood and drying for boards.

The maximum error (in accordance with the Russian State Standard GOST R 8.736–2011) for determining the shear strength of the samples along the glue seam is 0.02 MPa, and when static bending it is 0.03 MPa.

Research results and discussion

The results of determining the curing time of the binder are shown in table 1 and fig. 3, the parameters of plywood and composites based on the modified binder in are shown in table 2 and fig. 4–8.

Table 1

The results of determining the binder curing time

| Content of H ₂ O ₂ additive, % | 0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 4.0 |
|--|------|------|------|------|------|
| Binder curing time, s | 27.5 | 19.5 | 15.5 | 15.0 | 13.0 |

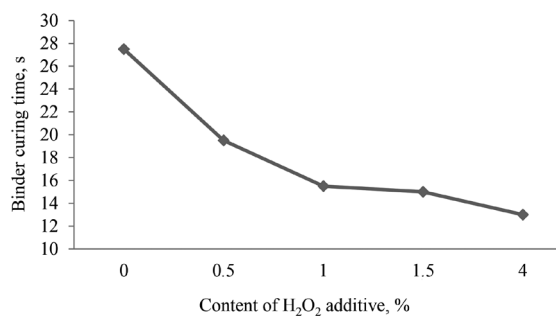


Fig. 3. Dependence of the binder curing time on the content of H₂O₂ additive

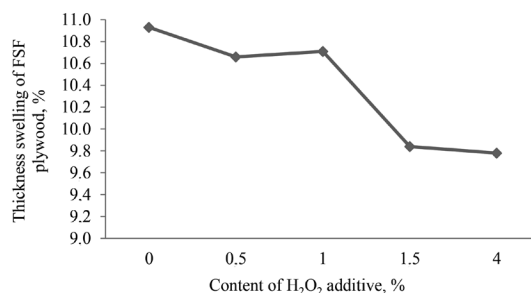
The addition of 1.0 % of H₂O₂ reduces the PFB curing time by 43.6 %. The results of determining the binder curing time confirmed the hypothesis that H₂O₂ is involved in cross-linking of the PFB. The acceleration of the binder curing time is the most intensive in the range of 0–1.0 % of the peroxide addition.

Table 2

Properties of plywood and composites on the modified binder

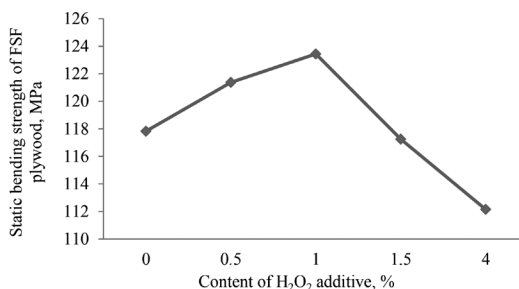
| Content of H ₂ O ₂ additive, % | FSF plywood | | | Thermal insulation composites | |
|--|-----------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| | Thickness swelling, % | Static bending strength, MPa | Shear strength along the glue seam, MPa | Thickness swelling, % | Static bending strength, MPa |
| 0 | 10.93 | 117.83 | 1.81 | 10.3 | 0.58 |
| 0.5 | 10.66 | 121.38 | 1.82 | 10.1 | 0.59 |
| 1.0 | 10.71 | 123.44 | 1.89 | 9.8 | 0.61 |
| 1.5 | 9.84 | 117.25 | 1.69 | 9.6 | 0.64 |
| 4.0 | 9.78 | 112.15 | 1.52 | 9.5 | 0.62 |

Fig. 4. Dependence of thickness swelling of FSF plywood on the content of H₂O₂ additive



The addition of 1 % of H₂O₂ reduces the thickness swelling of plywood by 2 % over 24 hours in water. The maximum increase in water resistance is realized by the addition of H₂O₂ in an amount of 1.5 %. At the same time, thickness swelling of plywood reduces by 9.97 %. A further increase in the content of the peroxide additive has a negligible effect on the reduction of thickness swelling of plywood after exposure to water.

Fig. 5. Dependence of the static bending strength of FSF plywood on the content of H₂O₂ additive



The addition of 1.0 % of H₂O₂ to the adhesive composition increases the static bending strength of plywood by 4.76 %, then the static bending strength of plywood reduces. The introduction of 4 % of peroxide is excessive and reduces the static bending strength by 4.8 %.

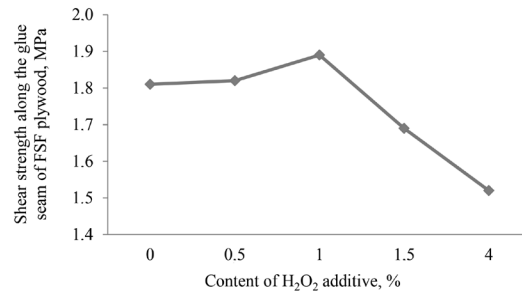


Fig. 6. Dependence of the shear strength along the glue seam of FSF plywood on the content of H₂O₂ additive

The shear strength along the glue seam of FSF plywood increases by 4.4 %, with the addition of 1.0 % of H₂O₂, then the shear strength along the glue seam of plywood decreases. Since this parameter characterizes the adhesive ability of the binder, the conclusion is that the addition of H₂O₂ over 1.0 % is excessive.

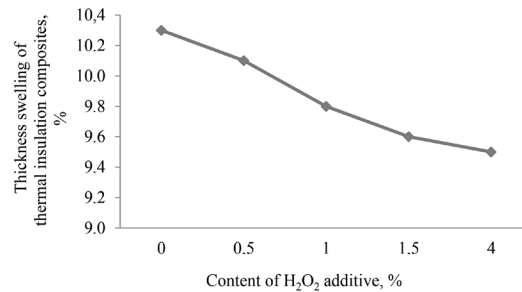


Fig. 7. Dependence of thickness swelling of thermal insulation composites on the content of H₂O₂ additive

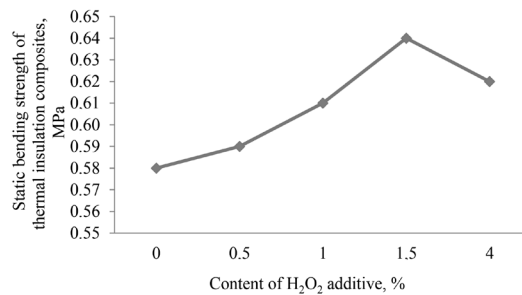


Fig. 8. Dependence of the static bending strength of thermal insulation composites on the content of H₂O₂ additive

Strength of thermal insulation composites made of cellulose-containing waste increases by 5.2 % with the addition of 1.0 % of H₂O₂ and thickness swelling decreases by 4.9 % over 24 h.

The static bending strength of FSF plywood increases with the addition of 0.5–1.0 % of H₂O₂ and then begins to decrease. The reason for this, in the authors' opinion, is the effect of H₂O₂ on both the adhesive composition and the wood components.

There is data [11] that hydrogen peroxide exposure to wood veneer initiates oxidative delignification of wood, while microcrystalline cellulose elements are formed for filler made of waste of plant annuals, such as flax and cotton [11].

At the initial stage oxidative delignification veneer has a positive effect on the elasticity of plywood, increasing the relative mobility of the lingo-carbohydrate complex elements. This process increases the static bending strength of plywood. The addition of 1 % of H₂O₂ to the PFB increases the degree of cross-linking of phenol formaldehyde resin. This increases the shear strength of plywood at the glue seam. A further increase in hydrogen peroxide addition leads to a reduction in strength.

The effect on the adhesive composition is due to the fact that an excess amount of H_2O_2 increases the amount of hydroxyperoxide anions, and the complex becomes unstable with an excessive amount of ligands. The presence of unstable complexes reduces the static bending strength of plywood by 4.8 %.

The microcrystalline cellulose presence in the polymer composition increases the composite strength [7]. Due to this, as well as due to the lower production temperature of thermal insulation composites based on the PFB modified with H_2O_2 , the strength of thermal insulation boards made of cellulose-containing wastes increases in the range up to 1.5 % of H_2O_2 additive.

According to Rafał Czarnecki and Janina Łęcka [3] modification of PFB with H_2O_2 increases the strength of particle boards; however, it has little effect on water resistance. Differences with the results of determining the water resistance of plywood and composites based on the modified binder, obtained in this work, are explained by the different type of cellulose-containing filler, as well as by the differences in technological factors of composite production processes.

Conclusion

The use of H_2O_2 as a modifying additive to phenol formaldehyde resin reduces the binder curing time and therefore makes it possible to reduce the pressing time of FSF plywood, and thus reduce the costs of plywood production.

The addition of H_2O_2 affects not only the binder cross-linking, but also veneer and cellulose-containing filler. Addition of 0.5–1.5 % of H_2O_2 improves the strength properties of FSF plywood and thermal insulation composites made of plant wastes; the addition of 4.0 % of H_2O_2 weakens the components of wood veneer and reduces the static bending strength of plywood.

The positive effect of H_2O_2 addition on water resistance of plywood and thermal insulation boards made of plant wastes was revealed. This is due to an increase in the cross-linking degree of the binder, as well as, apparently, the interaction of the hydroperoxide anion with the components of the cell wall.

The recommended hydrogen peroxide content is 1.0 % for FSF plywood and 1.5 % for thermal insulation boards. This will reduce the pressing (drying) time of the material and thus the production costs.

REFERENCES

1. Asim M., Saba N., Jawaid M., Nasir M. A Review on Phenolic Resin and Its Composites. *Current Analytical Chemistry*, 2017, vol. 14, no. 3, pp. 185–197. DOI: <https://doi.org/10.2174/1573411013666171003154410>
2. Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2021. 624 p.
3. Czarnecki R., Łęcka J. H_2O_2 as a Modifier of Phenol–Formaldehyde Resin Used in the Production of Particleboards. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, vol. 88, iss. 14, pp. 3084–3092. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.11962>
4. Dziurka D., Łęcka J., Mirski R. The Effect of Modification of Phenolic Resin with Alkylresorcinols and H_2O_2 on Properties of Plywood. *Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 2009, vol. 8, iss. 4, pp. 67–74.
5. Englund K. Tribology of Natural Fiber Polymer Composites. *Materials Today*, 2009, vol. 12, iss. 3, p. 45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(09\)70093-8](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(09)70093-8)

6. Gardziella A., Pilato L.A., Knop A. *Phenolic Resins*. New York, Springer, 2000. 566 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04101-7>
7. Golova L.K., Makarov I.S., Matukhina E.V., Kulichikhin V.G. Solutions of Cellulose and Its Blends with Synthetic Polymers in *N*-methylmorpholine-*N*-oxide: Preparation, Phase State, Structure, and Properties. *Polymer Science, Series A*, 2010, vol. 52, iss. 11, pp. 1209–1219. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965545X10110155>
8. Guo L., Wang L., Li J. Study on Modification of Phenol Formaldehyde Resin Adhesive with Ionic Liquid. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT 2012)*. Atlantis Press, 2012, pp. 1910–1913. DOI: <https://doi.org/10.2991/emeit.2012.422>
9. Hoong Y.B., Paridah M.T., Loh Y.F., Koh M.P., Luqman C.A., Zaidon A. *Acacia mangium* Tannin as Formaldehyde Scavenger for Low Molecular Weight Phenol-Formaldehyde Resin in Bonding Tropical Plywood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, vol. 24, iss. 8-10, pp. 1653–1664. DOI: <https://doi.org/10.1163/016942410X507740>
10. Krutov S.M., Evtuguin D.V., Ipatova E.V., Santos S.A.O., Sazanov Yu.N. Modification of Acid Hydrolysis Lignin for Value-Added Applications by Micronization Followed by Hydrothermal Alkaline Treatment. *Holzforschung*, 2015, vol. 69, no. 6, pp. 761–768. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0264>
11. Kuznetsov B.N., Sudakova I.G., Garyntseva N.V., Djakovitch L., Pinel C. Kinetic Studies and Optimization of *Abies* Wood Fractionation by Hydrogen Peroxide under Mild Conditions with TiO₂ Catalyst. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2016, vol. 120, iss. 1, pp. 81–94. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11144-016-1100-z>
12. Mansouri N.E.E., Yuan Q., Huang F. Preparation and Characterization of Phenol-Formaldehyde Resins Modified with Alkaline Rice Straw Lignin. *BioResources*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 8061–8075. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.13.4.8061-8075>
13. Royter V.A. *Catalytic Properties of Substances*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1968. 1464 p.
14. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. Wood Modification Technologies – A Review. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2017, vol. 10, iss. 6, pp. 895–908. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer2380-010>
15. Sedliačik J., Bekhta P., Potapova O. Technology of Low-Temperature Production of Plywood Bonded with Modified Phenol-Formaldehyde Resin. *Wood research*, 2010, vol. 55, iss. 4, pp. 123–130.
16. Shiraishi Y., Hagi T., Tanaka S., Ichikawa S., Hirai T. Solar-to-Hydrogen Peroxide Energy Conversion on Resorcinol-Formaldehyde Resin Photocatalysts Prepared by Acid-Catalysed Polycondensation. *Communications Chemistry*, 2020, vol. 3, art. 169. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42004-020-00421-x>
17. Shnawa H.A., Ibraheem I.K., Shenta A.A. Kinetic Study of Curing Phenol-Formaldehyde/Tannin-Formaldehyde Composite Resins. *Natural Resources*, 2015, vol. 6, no. 10, pp. 503–513. DOI: <https://doi.org/10.4236/nr.2015.610048>
18. Susoeva I.V., Vakhnina T.N. Unused Plant Waste and Thermal Insulating Composition Boards on Their Basis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2019, no. 7, pp. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2019-727-7-49-59>
19. Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Titunin A.A., Susoeva I.V. Influence of Modifiers on the Curing Time of the Phenol Formaldehyde Binder for Pressing Panels at Low Temperature Mode. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2019, no. 4(36), pp. 99–108. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/11>
20. Valyova M., Ivanova Y. Modified Phenol – Phormaldehyde Resins Used for Plywood Gluing. *International Journal – Wood, Design & Technology*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 35–48.

21. Vershal V.V., Medvedeva E.N., Rybalchenko N.A., Babkin V.A. Study of Decomposition of Hydrogen Peroxide in Alkaline Environment and Its Effect on Whitening Lignocellulose and Homogenous Lignin Oxidation. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 1998, no 1, pp. 45–50.

22. Yamamoto A., Rohumaa A., Hughes M., Vuorinen T., Rautkari L. Surface Modification of Birch Veneer by Peroxide Bleaching. *Wood Science and Technology*, 2017, vol. 1, iss. 51, pp. 85–95. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0880-7>

УДК 674.047.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172

КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЛАГООБМЕНА

*А.Г. Гороховский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6030-2018](https://orcid.org/0000-0001-8847-8217),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>*

*Е.Е. Шишкина, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6021-2018](https://orcid.org/0000-0002-2584-4897),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>*

*А.С. Агафонов, аспирант; ResearcherID: [ABD-5832-2021](https://orcid.org/0000-0002-0955-9068),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>*

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37,
г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: goralegr@yandex.ru, elenashishkina@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 25.05.21 / Принята к печати 19.08.21

Аннотация. Сушка древесины, в частности пиломатериалов, является одним из самых сложных и энергозатратных процессов в деревопереработке, практически полностью определяющим качество продукции, изготовляемой из древесины. Конвективная сушка пиломатериалов, во всем многообразии ее разновидностей, на сегодняшний день остается самой распространенной. Компьютерное моделирование процессов сушки древесины обычно проводится на основе решения систем, дифференциальных уравнений тепломассообмена. Методы решения подобных систем, как аналитические, так и численные, достаточно глубоко изучены и проработаны. Однако важнейшим методическим вопросом является корректное формулирование граничных условий, которые определяют процесс взаимосвязанного тепломассообмена на границе раздела фаз (древесина – влажный воздух). Для конвективной сушки традиционно использовались граничные условия III рода академика А.В. Лыкова, для которых характерно достаточно близкое соответствие потоков массы, движущейся из глубины древесины и на границе раздела фаз. Данное соответствие характеризуется величиной так называемого массообменного критерия Био. Для проверки высказанных предположений был проведен вычислительный эксперимент, позволивший определить возможную управляемость процесса влагоудаления при низкотемпературной конвективной сушке условного пиломатериала режимами трех- и бесступенчатой структуры. Помимо этого исследовалось влияние процесса влагоудаления на динамику внутренних напряжений в древесине. Результаты показали, что бесступенчатые режимы, с одной стороны, обеспечивают существенное повышение качества сушки практически без потери производительности лесосушильных камер, а с другой стороны, обладают более высокой управляемостью. Результаты ранее проведенных исследований позволили предложить общие принципы, а затем запатентовать коренным образом отличающуюся от ранее известных систем управления сушкой древесины систему автоматического управления влагообменом при сушке древесины. Данная система управляет процессом сушки за счет регулирования соотношения внешнего и внутреннего влагообмена, а не величины параметров среды в камере. Система управления влагообменом при конвективной сушке пиломатериалов является ограниченно управляющей: полностью стабилизировать значения массообменного критерия Био она не позволяет. Однако ее применение поддерживает определенный баланс между внутренним и внешним влагообменом, обеспечивает требуемое качество сушки и практически полностью исключает возникновение брака.

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Агафонов А.С. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172

Ключевые слова: система управления сушкой, влагообмен, конвективная сушка пиломатериалов, массообменный критерий Био.

LUMBER CONVECTIVE DRYING BASED ON CONTROLLED MOISTURE TRANSFER

Alexandr G. Gorokhovskiy, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: O-6030-2018,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>

Elena E. Shishkina, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: O-6021-2018,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

Artem S. Agafonov, Postgraduate Student; ResearcherID: ABD-5832-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: goralegr@yandex.ru, elenashishkina@yandex.ru

Original article / Received on May 25, 2021 / Accepted on August 19, 2021

Abstract. Wood drying (in particular lumber drying), which almost entirely determines the quality of the wooden products, is one of the most complicated and energy-consuming processes in wood processing. Convective drying of lumber, in all its varieties, remains the most common by far. Computer modeling of wood drying processes is usually based on solving systems of differential heat and mass transfer equations. The methods for solving such systems, both analytical and numerical, are well researched and developed. However, the most important methodological issue is the correct formulation of the boundary conditions that determine the process of interrelated heat and mass transfer at the interface (wood – moist air). The convective drying has traditionally used the boundary conditions of type III by Academician A.V. Lykov, which are characterized by a sufficiently close correspondence between the mass flows moving from the wood depth and at the interface. This correspondence is described by the value of the so-called Bio mass transfer criterion. A computational experiment was carried out to verify these assumptions. It enabled to determine the possible controllability of the moisture removal during low-temperature convective drying of conventional lumber using modes of three-step and stepless structure. Besides this, the influence of the moisture removal on the dynamics of the internal stresses in wood was also studied. The results have shown that the stepless drying modes, on the one hand, offer a significant improvement in drying quality with practically no loss of drying capacity, and on the other hand, have better controllability. The results of the previously conducted and mentioned studies made it possible to propose general principles and then to patent a system for automatic control of moisture transfer during wood drying, which is fundamentally different from the previously known wood drying control systems. The system controls the drying process by adjusting the ratio of external to internal moisture transfer, rather than the value of the media parameters in the chamber. The moisture transfer control system for convective drying of lumber is of limited control: it cannot fully stabilize the values of the Bio mass transfer criterion. However, its use maintains a certain balance between internal and external moisture transfer, ensures the required drying quality and almost completely eliminates the occurrence of defects.

For citation: Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Agafonov A.S. Lumber Convective Drying Based on Controlled Moisture Transfer. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

Keywords: drying control system, moisture transfer, lumber convective drying, Bio mass transfer criterion.

Введение

Для теоретического анализа процессов низкотемпературной конвективной сушки древесины обычно используют систему уравнений теплообмена, предложенную А.В. Лыковым [9],

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{\varepsilon r_{\phi} a_m}{c} \nabla^2 u; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t, \quad (2)$$

где t – температура, °С; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности древесины, м²/с; ε – критерий фазового превращения; r_{ϕ} – теплота парообразования, Дж/кг; a_m – коэффициент влагопроводности древесины, м²/с; c – теплоемкость древесины, Дж/кг·град; u – влажность.

При этом чаще всего заданную систему решают с граничными условиями III рода [5–9, 16–22], которые для неограниченной пластины (доска) выглядят следующим образом:

$$-\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(R, \tau)] - (1 - \varepsilon) \rho_{\phi} r_{\phi} \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0; \quad (3)$$

$$a_m \frac{\partial u(R, \tau)}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности древесины, Вт/м²·град; α – коэффициент теплообмена, Вт/м²·град; R – половина толщины доски, м; x – координата, м; ρ_{ϕ} – базисная плотность древесины, кг/м³; α_m – коэффициент влагообмена, м/с; u_p – равновесная влажность древесины.

Процесс сушки считается близким к оптимальному [8] при условии, что потоки влаги – идущий из глубины сортамента i_{am} и испаряющийся с поверхности древесины $i_{\alpha m}$ – равны (или достаточно близки) между собой [9]:

$$i_{am} = -a_m \rho_{\phi} \nabla u;$$

$$i_{\alpha m} = \alpha_m \rho_{\phi} (u_n - u_p),$$

где u_n – влажность поверхности древесины.

Ясно, что их практическое равенство возможно лишь при вполне определенном отношении коэффициента влагообмена к коэффициенту влагопроводности, которое определяется величиной массообменного критерия Био [9]:

$$Bi_m = \frac{\alpha_m}{a_m} R.$$

Очевидно, что, варьируя величины α_m и a_m в ходе сушки, мы имеем возможность сделать процесс влагоудаления в известной степени управляемым.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования была использована модель процесса низкотемпературной сушки пиломатериалов на основе системы дифференци-

альных уравнений тепломассообмена (1), (2) с граничными условиями (3), (4). Реализация вычислительного эксперимента для сушки условного пиломатериала режимами трех и бесступенчатой структуры [3] проводилась в среде Mathcad [14]. Для анализа возможной управляемости процесса сушки определялось значение Bi_m , а также влажностные напряжения в процессе сушки на многостержневой модели доски Б.Н. Уголева [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице.

Расчетные параметры исследованных режимов сушки

| Тип режима | Bi_m | | Конечная влажность древесины, % | | | Максимальное влажностное напряжение, МПа |
|-----------------|--------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------|--|
| | максимальное | минимальное | максимальная | минимальная | средняя | |
| Трехступенчатый | 38 | 20 | 10 | 6 | 8 | 3,2 |
| Бесступенчатый | 17 | 12 | 9 | 7 | 8 | 1,9 |

Особенности тепломассообмена для трех- и бесступенчатой структур режима были проанализированы в [4]. В дополнение к сказанному ранее можно отметить следующее.

1. Бесступенчатый режим обладает существенно бóльшим потенциалом управляемости. Так, для него $\frac{Bi_m \max}{Bi_m \min} \approx 1,4$, в то время как для трехступенчатого $\frac{Bi_m \max}{Bi_m \min} \approx 1,9$.

2. Бесступенчатый режим обеспечивает значительно более высокое качество сушки. При этом меньше перепад влажности по толщине доски и внутренние напряжения в древесине.

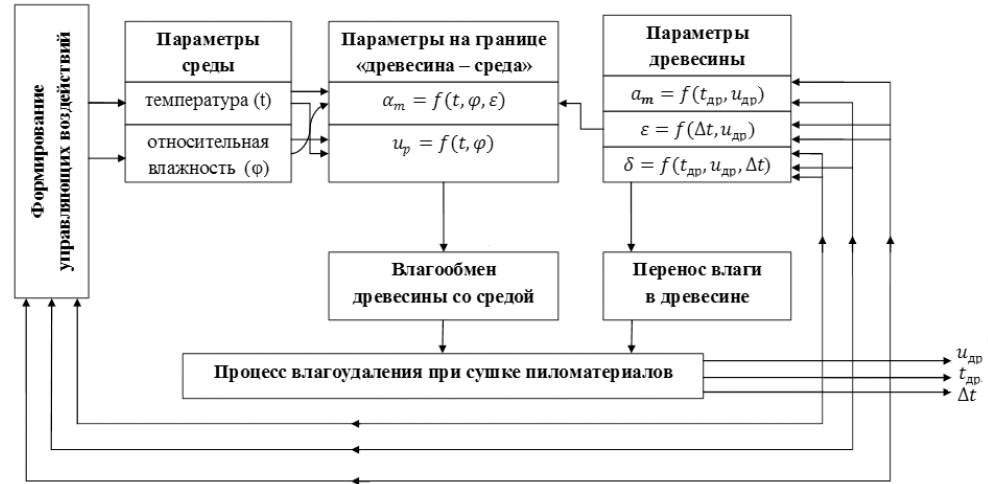
3. Плавное изменение параметров режима вследствие отсутствия ступеней сушки позволяет обеспечить также плавное течение переходных процессов и ставить вопрос о реальной возможности создания системы автоматического управления сушкой.

4. На основе комплекса проведенных исследований [13] нами предложены принципы управления сушкой [11], а затем и принципы построения системы управления влагообменом при сушке пиломатериалов. Необходимо отметить, что данные вопросы оказывались в поле зрения многих авторов [1, 2, 4, 10, 12, 15], однако разработанные ими системы, как правило, управляли параметрами среды в сушильной камере, а не собственно процессом сушки за счет регулирования соотношения внутреннего и внешнего влагообмена.

На рисунке [14] приведена структурная схема системы управления процессом влагоудаления при конвективной сушке пиломатериалов.

Выходные параметры системы: влажность сохнувшего сортамента древесины (u); температура древесины ($t_{др}$); градиент температуры по сечению доски (Δt) [11].

Система охвачена двумя контурами обратной связи: по параметрам переноса влаги в древесине и по параметрам влагообмена древесины со средой.



Структурная схема системы управления сушкой

Block diagram of the drying control system

Важно, что управляющим является второй контур обратной связи. Управление величиной критерия Био производится путем регулирования параметров среды: температуры воздуха и его относительной влажности.

Использование системы управления влагообменом [4, 15] позволяет определять параметры режима непосредственно в процессе сушки и получать пиломатериалы заданной категории качества в зависимости от требований потребителя.

Выводы

1. Система управления влагообменом при конвективной сушке является ограниченно управляющей, т. к. полностью стабилизировать массообменный критерий Био она не позволяет.

2. Система дает возможность поддерживать определенный баланс между внутренним и внешним влагообменом сохнущего сортимента древесины, тем самым обеспечивая требуемое качество сушки и практически полностью исключая вероятность возникновения брака. Постоянный мониторинг текущей влажности древесины гарантирует необходимую конечную влажность.

3. Принципиальной особенностью системы является возможность непрерывного контроля градиента температуры по сечению сортимента, что позволяет при необходимости корректировать параметры среды по критерию фазового перехода и термоградиентному коэффициенту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агапов В.П. Автоматизация управления процессом сушки по психрометрической разности // Сушка древесины: материалы всесоюз. науч.-техн. совещ. Архангельск: ЦНИИМОД, 1975. С. 24–27. Agapov V.P. Automation of Drying Process Control by Psychrometric Difference. *Drying of Wood: Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Meeting*. Arkhangelsk, TsNIIMOD Publ., 1975, pp. 24–27.

2. Богданов Е.С. Автоматизация процессов сушки пиломатериалов. М.: Лесн. пром-сть. 1979. 175 с. Bogdanov E.S. *Automation of Lumber Drying Processes*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 175 p.

3. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Особенности тепломассообмена при сушке пиломатериалов бесступенчатыми режимами // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 2. С. 139–143. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. Features of Heat and Mass Transfer at Drying of Timber by Stepless Modes. *Hvoynye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2019, vol. 37, no. 2, pp. 139–143.

4. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Гороховский А.А. Режимы конвективной сушки пиломатериалов: оптимизация структуры и величин технологических параметров // Деревообработ. пром-сть. 2010. № 4. С. 14–16. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.A. Modes of Convective Drying of Lumber: Optimization of the Structure and Values of Technological Parameters. *Derevoobrabatival'naya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2010, no. 4, pp. 14–16.

5. Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Кундас С.П. Моделирование тепломассопереноса и поверхностных явлений в капиллярно-пористых средах на основе уравнений двухфазной фильтрации и изотерм сорбции // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011. № 2(7). С. 146–150. Grinchik N.N., Gishkelyuk I.A., Kundas S.P. Modelling of Heat and Mass Transfer and Surface Phenomena in Capillaryporous Media Based on Equations of Two-Phase Filtration and Sorption Isotherms. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies], 2011, no. 2(7), pp. 146–150.

6. Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Куц П.С., Павлюкевич Н.В., Терехов В.И. К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах // Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76, № 6. С. 129–141. Grinchik N.N., Akulich P.V., Kuts P.S., Pavlyukevich N.V., Terekhov V.I. On the Problem of Nonisothermal Mass Transfer in Porous Media. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2003, vol. 76, no. 6, pp. 129–141. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000012041.81528.02>

7. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 2001. 550 с. Kartashov E.M. *Analytical Methods in the Theory of Thermal Conductivity of Solids*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 550 p.

8. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: Высш. шк., 2005. 432 с. Kudinov V.A., Kartashov E.M., Kalashnikov V.V. *Analytical Solutions for Problems of Heat and Mass Transfer and Thermoelasticity for Multilayer Structures*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 432 p.

9. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с. Lykov A.V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 470 p.

10. Морозов В.М. Автоматизация сушки пиломатериалов как фактор экономного расходования тепловой и электрической энергии // Рациональное использование энергетических ресурсов при сушке пиломатериалов. Саласпилс, 1983. С. 32–36. Morozov V.M. *Automation of Lumber Drying as a Factor of Economical Consumption of Heat and Electric Energy. Rational Use of Energy Resources in Drying Lumber*. Salaspils, 1983, pp. 32–36.

11. Патент 2638229 С2 РФ, МПК F26B 3/04, F26B 21/12. Способ сушки пиломатериалов: № 2015140179: заявл. 21.09.2015; опубл. 12.12.2017 / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Сливина. Gorokhovskij A.G., Shishkina E.E., Slivina E.V. *Method for Drying Lumber*. Patent RF no. RU 2638229 C2, 2017.

12. Савенко В.Г., Савенко А.В., Петрухин Ю.П. Повышение эффективности системы управления процессом сушки пиломатериалов // Деревообработ. пром-сть. 2004. № 4. С. 15–17. Savenko V.G., Savenko A.V., Petrukhin Yu.P. Improving the Control System Efficiency of the Lumber Drying Process. *Derevoobrabatival'naya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2004, no. 4, pp. 15–17.

13. Старова Е.В. Технология сушки пиломатериалов режимами оптимизированной структуры: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 163 с. Starova E.V. *Lumber Drying Technology with Optimized Structure Modes*: Cand. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2018. 163 p.
14. Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск: САФУ, 2016. 40 с. Shishkina E.E. *Energy-Saving Technology for Convective Drying of Lumber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 40 p.
15. Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г. Оптимизация структуры и величины параметров режимов конвективной сушки пиломатериалов по показателям эффективности и качества // Изв. СПбЛТА. 2015. Вып. 213. С. 232–241. Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.G. Optimization of the Structure and Size of the Parameters Modes of Convective Drying Lumber in terms of Efficiency and Quality. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2015, iss. 213, pp. 232–241.
16. Azzouz S., Ben Dhib K., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: [10.1007/s00107-017-1212-9](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1212-9)
17. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. *Wood Science and Technology*, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: [10.1007/s00226-010-0391-x](https://doi.org/10.1007/s00226-010-0391-x)
18. Da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M.F. One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, iss. 4, pp. 364–371. DOI: [10.1007/s10086-015-1479-6](https://doi.org/10.1007/s10086-015-1479-6)
19. Moises S.A., Pereira S.L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 12–18. DOI: [10.4236/jdaip.2014.21003](https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003)
20. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics. *Drying Technology*, 2018, vol. 36, iss. 15, pp. 1920–1929. DOI: [10.1080/07373937.2018.1463538](https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1463538)
21. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. *Wood Science and Technology*, 2017, vol. 51, iss. 4, pp. 739–749. DOI: [10.1007/s00226-017-0918-5](https://doi.org/10.1007/s00226-017-0918-5)
22. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzhanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, iss. 2, pp. 310–317. DOI: [10.1007/s10891-017-1569-y](https://doi.org/10.1007/s10891-017-1569-y)



УДК 66.011

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-173-187

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОМЫЛЕНИЯ ТАЛЛОВОГО ПЕКА МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

А.О. Коршунов¹, аспирант, инж.; ResearcherID: [0-8530-2017](https://orcid.org/0000-0002-4819-9106),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4819-9106>

Е.А. Лаврентьева^{1,2}, инж.; ResearcherID: [AAZ-2913-2020](https://orcid.org/0000-0002-7645-1831),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7645-1831>

М.А. Лазарев^{1,2}, канд. хим. наук, зав. лаб.; ResearcherID: [AAZ-2946-2020](https://orcid.org/0000-0002-9252-4359),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9252-4359>

А.Б. Радбиль^{1,2}, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAZ-6166-2020](https://orcid.org/0000-0002-4949-633X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4949-633X>

¹НИИ химии Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, д. 23, корп. 5, г. Нижний Новгород, Россия, 603950; e-mail: korshalexey@gmail.com

²Управляющая компания Биохимического холдинга «Оргхим», ул. Белинского, д. 55 а, г. Нижний Новгород, Россия, 603950; e-mail: m.lazarev@orgkhim.com

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 01.10.20 / Принята к печати 11.12.20

Аннотация. Рациональная переработка отходов лесохимического производства является одной из актуальных проблем современной технологии. Талловый пек, побочный продукт целлюлозно-бумажного производства, нашел применение как потенциальный источник фитостероидов. Фитостероиды, или растительные стеролы, – природные соединения, полициклические спирты, по строению близкие к стероидам. Благодаря своей биологической активности фитостероиды используются в таких сферах, как фармацевтика, косметология, в качестве функциональных продуктов и др., что делает их коммерчески привлекательными. Рассмотрена стадия омыления таллового пек, в результате которой удается получить фитостероиды в свободной форме из их сложных эфиров с жирными и смоляными кислотами. Центральный композиционный план, дополненный шестью звездными точками, был выбран для определения совокупного влияния трех факторов и для планирования минимального количества опытов, а методология поверхности отклика использована для нахождения оптимальных значений переменных. На основании экспериментальных данных разработаны регрессионные модели, отражающие влияние основных технологических факторов (избыток щелочи, температура и время омыления) на степень омыления фитостероидов в омыленном талловом пек и сложных эфиров в получаемом экстракте. Проведен статистический анализ этих моделей. При помощи дисперсионного анализа доказана их адекватность. Экспериментальные и предсказанные значения находились в тесном согласии. Разработанные математические модели в виде регрессионного полинома посредством программного обеспечения Minitab позволяют найти оптимальные значения входных переменных процесса при одновременном достижении максимальной степени омыления фитостероидов (98,1 %) с минимальным значением эфирного числа в экстракте (4 мг КОН/г): температура омыления – 121,7 °С, продолжительность процесса – 3,18 ч и избыток щелочи – 100 %. Таким

образом, были получены надежные модели для прогнозирования степени омыления фитостеринов и эфирного числа в экстракте, которые могут быть использованы в промышленном процессе омыления таллового пека.

Для цитирования: Коршунов А.О., Лаврентьева Е.А., Лазарев М.А., Радбиль А.Б. Оптимизация процесса омыления таллового пека методом планирования эксперимента // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С 173–187. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-173-187

Ключевые слова: талловый пек, фитостерины, омыление, оптимизация процесса, центральный композиционный план, методология поверхности отклика.

OPTIMIZATION OF TALL OIL PITCH SAPONIFICATION BY EXPERIMENTAL DESIGN

*Alexey O. Korshunov*¹, Postgraduate Student, Engineer; ResearcherID: [O-8530-2017](https://orcid.org/0000-0002-4819-9106),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4819-9106>

Elizaveta A. Lavrenteva^{1,2}, Engineer; ResearcherID: [AAZ-2913-2020](https://orcid.org/0000-0002-7645-1831),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7645-1831>

Mikhail A. Lazarev^{1,2}, Candidate of Chemistry, Head of Laboratory;
ResearcherID: [AAZ-2946-2020](https://orcid.org/0000-0002-9252-4359), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9252-4359>

Arkadiy B. Radbil^{1,2}, Doctor of Engineering, Leading Research Scientist;
ResearcherID: [AAZ-6166-2020](https://orcid.org/0000-0002-4949-633X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4949-633X>

¹Research Institute for Chemistry, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, prosp. Gagarina, 23, korp. 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation; e-mail: korshalexey@gmail.com

²ORGKHM Biochemical Holding Management Company, ul. Belinskogo, 55a, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation; e-mail: m.lazarev@orgkhim.com

Original article / Received on October 1, 2020 / Accepted on December 11, 2020

Abstract. Sustainable recycling of wood chemical production wastes is one of the current issues of modern technology. As a by-product of the pulp and paper industry, tall oil pitch has found application as a potential source of phytosterols. Phytosterols or plant sterols are natural compounds, polycyclic alcohols structurally similar to steroids. Due to their biological activity, phytosterols are used in such areas as pharmaceuticals and cosmetology, as functional products, etc., which makes them commercially attractive. This paper considers the stage of saponification of tall oil pitch, which yields free phytosterols from their esters with fatty and resin acids. A central composite design complemented by six star points was chosen to determine the combined effect of the three factors and to plan the minimum number of experiments; the response surface methodology was used to determine the optimal values of the variables. Regression models showing the impact of the basic technological factors (excess alkali, temperature and duration of saponification) on the degree of saponification of phytosterols in saponified tall oil pitch and esters in the obtained extract were developed based on the experimental data. A statistical analysis of the models was carried out. Their validity has been proved by means of analysis of variance. The experimental and predicted values closely correlated. The developed mathematical models in the regression polynomial form enable to find the optimal values of the input process variables using the Minitab software while simultaneously reaching the maximum degree of saponification (98,1 %) with the minimum value of the ether number in the extract (4 mg KOH/g): saponification temperature – 121.7 °C, process duration – 3.18 h, and excess alkali – 100 %. Thus, reliable models for predicting the degree of saponification of phytosterols and the ester number in the extract were obtained. These models can be used in industrial saponification of tall oil pitch.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

For citation: Korshunov A.O., Lavrenteva E.A., Lazarev M.A., Radbil' A.B. Optimization of Tall Oil Pitch Saponification by Experimental Design. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 173–187. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-173-187

Keywords: tall oil pitch, phytosterols, saponification, process optimization, central composite design, response surface methodology.

Введение

Комплексная переработка отходов лесохимических производств становится все более актуальным направлением, позволяющим наиболее эффективно потреблять имеющиеся ресурсы и при этом получать высокомаржинальные продукты. Одним из примеров такого разумного использования побочных продуктов может являться переработка таллового пека (ТП) – нелетучего остатка от ректификации сырого таллового масла.

ТП, полученный на целлюлозно-бумажных предприятиях, чаще всего сжигается как побочный продукт [25]. Существуют и рациональные способы его использования: при производстве лаков и красок [7], в качестве воздуховолекающей добавки [3], антисептических компонентов [9] и др. Однако наибольшее значение для промышленности талловый пек имеет, находя применение как природный возобновляемый источник фитостероидов [1].

Фитостероиды представляют собой выделяемые из неомыляемой части липидов растений стероидные спирты со структурой, близкой к структуре холестерина [12]. Фитостероиды являются ценными компонентами, поскольку обладают высокой биологической активностью, благодаря чему могут применяться в различных отраслях промышленности [10, 17].

В процессе ректификации сырое талловое масло подвергается воздействию высоких температур (до 250...270 °С), в результате чего этерификация фитостероидов с жирными и смоляными кислотами протекает очень интенсивно, и большая часть спиртов образует сложные эфиры. Кроме того, свободные жирные и смоляные кислоты также под воздействием высоких температур димеризируются, что приводит к образованию димеров жирных и смоляных кислот, спиртовых составляющих и сложных эфиров [22].

Для эффективного выделения свободных фитостероидов необходимо на первой стадии разорвать эфирные связи с жирными и смоляными кислотами и их димерами. Для этого, как правило, используют такие способы, как щелочной гидролиз [11] и трансэтерификация.

Сложный состав ТП [8, 18] и условия его образования при высоких температурах обуславливают возможность присутствия в пеке кроме сложных эфиров фитостероидов других сложных эфиров, которые при экстракции переходят в экстракт вместе с фитостероидами. В связи с этим целесообразно использовать такой показатель, как эфирное число (ЭЧ) в экстракте, свидетельствующее о наличии значительных количеств сложных эфиров.

В разработанном нами ранее способе [13] выделения фитостероидов подобраны условия омыления ТП раствором щелочи в среде многоатомного спирта при атмосферном давлении. Однако условия не были оптимизированы. При анализе литературы обнаружено, что исследований, касающихся улучшения процесса омыления, не так много. Оптимизация условий омыления ТП изуче-

на в работе советских ученых [11]. Авторами работы предложен симплексный метод оптимизации, учитывающий наиболее важные факторы, влияющие на процесс омыления: давление в растворе, продолжительность омыления, количество щелочи. Однако данный метод позволяет оптимизировать только конечный выход без учета желательности факторов.

Методология поверхности отклика представляет собой совокупность математических и статистических методов, применимых для моделирования, анализа проблем и оптимизации исследуемого отклика, на который влияют несколько переменных [2, 20]. Данная методология использует множественный регрессионный и корреляционный анализ в качестве инструментов для оценки влияния двух или более независимых факторов на зависимые переменные.

Цель исследования – изучить влияние основных факторов (температура, продолжительность, избыток щелочи) на процесс омыления ТП с использованием методологии поверхности отклика и оптимизировать данные условия для достижения максимальной степени омыления фитостеринов с минимально возможным ЭЧ в экстракте.

Объекты и методы исследования

Исследованы неочищенные холестерин, гексаметилдисилазан, триметилхлорсилан, β -ситостерин, циклоартенол, 24-метиленициклоартенол и бетулинол фирмы «Sigma-Aldrich». Этиленгликоль, гексан и гидроксид натрия имели степень чистоты ЧДА и не требовали дополнительной очистки.

Образец ТП, исследуемый в данной работе, предоставлен Котласским целлюлозно-бумажным комбинатом (г. Коряжма, Архангельская обл.) и проанализирован в соответствии с известными методиками (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики исследуемого ТП

| Показатель | Значение | Методика определения |
|--------------------------------------|----------|----------------------|
| Кислотное число (КЧ), мг КОН/г | 46,7 | [4] |
| Число омыления (ЧО), мг КОН/г | 105,5 | [5] |
| Содержание свободных фитостеринов, % | 0,45 | [19] |
| Содержание всех фитостеринов, % | 10,0 | [19] |

Омыление ТП проводили в обогреваемом реакторе вместимостью 1 л с верхнеприводной мешалкой, термопарой и обратным холодильником. В реактор загружали 200 г исходного сырья, добавляли расчетное количество этиленгликоля и водного раствора щелочи требуемой концентрации. Реакционную смесь нагревали до заданной температуры и выдерживали определенное время при интенсивном перемешивании. Полученную реакцию смесь анализировали на содержание свободных фитостеринов и ЭЧ.

Анализ омыленного таллового пека (ОТП) проводили так: к образцу ОТП добавляли внутренний стандарт – холестерин, после чего образец гомогенизировали с водой и экстрагировали петролейным эфиром, из объединенных экстрактивных вытяжек отгоняли растворитель, экстракт сушили до постоянной

массы. Затем к экстракту добавляли дериватирующий реагент, переводя свободные фитостерины в триметилсилил эфирные производные, и проводили газохроматографический анализ.

Содержание фитостеринов определяли газофазной хроматографией с использованием газового хроматографа «Хроматек 5000.1» (Россия) с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной хроматографической колонкой длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм.

Условия хроматографирования были следующие. Неподвижная фаза – 5 % фенил и 95 % диметилполисилоксан, толщина пленки – 0,125 мкм. В качестве газа-носителя применяли гелий при давлении на входе в колонку 95 кПа. Инжектор и детектор нагревали до 310 °С. Применяемая температурная программа: 60 °С в течение 1 мин, затем градиент от 15 °С/мин до 200 °С, после с градиентом 2,5 °С/мин до 300 °С. Для идентификации фитостеринов использовали стандарты: β-ситостерин, циклоартенол и 24-метиленициклоартенол, а также бетулин.

КЧ и ЧО находили по стандартизированным методикам [4, 5].

Определение ЭЧ в экстракте проводили так: образец ОТП экстрагировали углеводородным растворителем С10-С13, из объединенных экстрактивных вытяжек отгоняли растворитель, экстракт сушили до постоянной массы. После чего в экстракте устанавливали КЧ и ЧО, ЭЧ находили как разницу между ЧО и КЧ.

Степень омыления фитостеринов (далее – степень омыления) – показатель, характеризующий процесс щелочного гидролиза сложных эфиров фитостеринов и показывающий, какая доля фитостеринов перешла в свободную форму от теоретически возможного. Степень омыления рассчитывали по следующей формуле:

$$\text{Степень омыления} = \frac{\text{Свободные фитостерины в ОТП (экспериментальное значение)}}{\text{Свободные фитостерины в ОТП (теоретическое значение)}} \cdot 100 \%$$

Для того чтобы изучить влияние независимых переменных на степень омыления и ЭЧ в экстракте, использовали центральный композиционный план (ЦКП) с тремя факторами: температура (°С), продолжительность (ч) и избыток щелочи (%) (расчет по ЧО пека) (табл. 2).

Таблица 2

Факторы и уровни ЦКП для изучения омыления ТП

| Фактор | Условное обозначение | Нижний уровень | Основной уровень | Верхний уровень |
|----------------------|----------------------|----------------|------------------|-----------------|
| | | –1 | 0 | +1 |
| Температура, °С | x_1 | 110 | 120 | 130 |
| Продолжительность, ч | x_2 | 1 | 3 | 5 |
| Избыток щелочи, % | x_3 | 0 | 50 | 100 |

Уровни факторов основаны на предварительных экспериментах и выбраны для охвата диапазона значений, представляющих практический интерес. ЦКП, состоящий из 3-факторного 2-уровневого плана, включал в себя 15 экспериментальных точек – 8 точек, дополненных 6 звездными точками с плечом, равным 1, и 1 точкой в центре плана. Эксперименты выполне-

ны в случайном порядке в целях компенсации систематических погрешностей. Значение отклика в каждой экспериментальной точке определено как минимум по двум опытам. Для математической обработки полученных данных использовали пакет прикладных программ Minitab 19.1.0 (trial version). Проводили регрессионный анализ и строили полиномиальные модели второго порядка по общей формуле:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{ij=1(i \neq j)}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2,$$

где Y – функция отклика; b_0 – свободный член; k – количество факторов; i – порядковый номер фактора ($i = 1, 2, 3$); b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты линейного эффекта, квадратичного эффекта и парного взаимодействия факторов; j – порядковый номер парного взаимодействия факторов; x_i и x_j – независимые переменные.

Дисперсионный анализ выполняли для проверки адекватности и пригодности прогнозируемых моделей с уровнем достоверности 95 % ($\alpha = 0,05$). Экспериментальные данные проверяли с помощью нескольких описательных статистических анализов, таких как коэффициент детерминации (R^2), его скорректированное ($R^2_{\text{скор}}$) и предсказанное ($R^2_{\text{пред}}$) значения, F-критерий (Критерий Фишера) и р-значение для оценки статистической значимости разработанных моделей.

Результаты исследования и их обсуждение

Чтобы изучить влияние переменных на процесс омыления и определить оптимальные условия, было проведено 34 эксперимента. В табл. 3 показаны условия экспериментов с результатами для моделей Y_1 (степень омыления, %) и Y_2 (ЭЧ в экстракте, мг КОН/г).

Применив множественный регрессионный анализ к полученным данным, нашли коэффициенты регрессионных моделей Y_1 и Y_2 . Значимость коэффициентов определили по критерию Стьюдента (t-критерий) и р-значению.

Если расчетный уровень значимости коэффициента больше, чем $\alpha = 0,05$, то коэффициент статистически незначителен, и модель следует пересчитать без учета данного коэффициента. Для Y_1 определили, что все коэффициенты значимы (р-значение $< 0,05$), в то время как для Y_2 $x_1^2, x_1 x_2$ и $x_1 x_3$ оказались незначимы (р-значение $> 0,05$).

Выразили полиномиальные уравнения, которые использовали для определения оптимизированных значений:

$$Y_1 = 85,746 + 4,290x_1 + 4,606x_2 + 19,229x_3 - 1,971x_1x_2 - 2,588x_1x_3 - 3,297x_2x_3 - 4,270x_1^2 - 5,610x_2^2 - 7,080x_3^2;$$

$$Y_2 = 9,436 - 1,731x_1 - 2,165x_2 - 12,095x_3 + 0,615x_2x_3 + 3,368x_2^2 + 7,088x_3^2.$$

Для Y_1 и Y_2 определили критерий Фишера ($F_{\text{расч}}$), равный 125 и 1583 соответственно. Эти значения превышают $F_{\text{табл}}$, что свидетельствует о том, что регрессионные уравнения на 95 % соответствуют исходным данным и могут считаться адекватными.

Таблица 3

Результаты экспериментов с использованием ЦКП

| x_1 , °C | x_2 , ч | x_3 , % | Степень омыления, % | ЭЧ в экстракте, мг КОН/г |
|------------|-----------|-----------|---------------------|--------------------------|
| 130 | 5 | 100 | 91,2 ± 2,8 | 4,7 ± 0,1 |
| 110 | 5 | 100 | 88,1 ± 1,7 | 8,0 ± 0,3 |
| 130 | 5 | 0 | 61,2 ± 1,3 | 27,5 ± 0,5 |
| 110 | 5 | 0 | 52,3 ± 1,8 | 31,6 ± 0,2 |
| 130 | 1 | 100 | 90,4 ± 2,0 | 7,0 ± 0,2 |
| 110 | 1 | 100 | 84,0 ± 3,0 | 11,4 ± 0,2 |
| 130 | 1 | 0 | 51,8 ± 1,8 | 33,4 ± 0,2 |
| 110 | 1 | 0 | 30,4 ± 1,8 | 36,3 ± 0,2 |
| 130 | 3 | 50 | 83,5 ± 0,8 | 8,1 ± 0,1 |
| 110 | 3 | 50 | 80,5 ± 1,7 | 10,9 ± 0,1 |
| 120 | 3 | 0 | 62,0 ± 1,8 | 27,9 ± 0,1 |
| 120 | 3 | 100 | 96,4 ± 0,6 | 4,5 ± 0,2 |
| 120 | 5 | 50 | 85,5 ± 1,7 | 9,8 ± 0,1 |
| 120 | 1 | 50 | 75,8 ± 2,1 | 15,2 ± 0,2 |
| 120 | 3 | 50 | 87,5 ± 1,1 | 9,8 ± 0,9 |
| | | | 84,0 ± 0,4 | 9,1 ± 0,4 |
| | | | 83,7 ± 2,1 | 10,0 ± 0,8 |

Адекватность моделей анализировали путем оценки R^2 , который является мерой силы линейного отношения между экспериментальными и прогнозируемыми значениями. В частности, модель может считаться приемлемой, если $R^2 > 0,95$. Это означает, что с помощью модели можно объяснить до 95 % изменчивости данных. По результатам анализа R^2 составил 0,9791 и 0,9972 для Y_1 и Y_2 соответственно. Для большего количества факторов $R^2_{\text{скор}}$ является более предпочтительным для проверки адекватности модели. $R^2_{\text{скор}} > 0,95$ (0,9713 и 0,9965 для Y_1 и Y_2 соответственно), что еще раз подтверждает точность предлагаемых моделей с откликами в указанных условиях. Кроме того, отношение $R^2_{\text{пред}}$ и $R^2_{\text{скор}}$ было оптимально, когда их значения находились в пределах 0,3 друг от друга (0,0167 и 0,0008 для Y_1 и Y_2 соответственно). Это указывает на точность представления предложенными регрессионными моделями фактической связи между выбранными переменными.

Приемлемость моделей Y_1 и Y_2 проверили с помощью теста на отсутствие ошибки, который сравнивает ошибку, связанную с подобранной моделью, и чистую ошибку из реплицированных проектных точек. Если р-значение, превышает 0,05, то ошибка незначительна по сравнению с чистой ошибкой. Существует вероятность 6,2 и 5,3 % для Y_1 и Y_2 соответственно, что F-значения могут возникать из-за шума – возможности модели прогнозировать экспериментальные данные несколько ограничены.

На рис. 1 представлены диагностические графики сравнения предсказанных и фактических значений. Показано, что точки данных моделей Y_1 и Y_2 на графиках лежат близко к прямой линии, т. е. экспериментальные данные и данные моделей хорошо коррелируют.

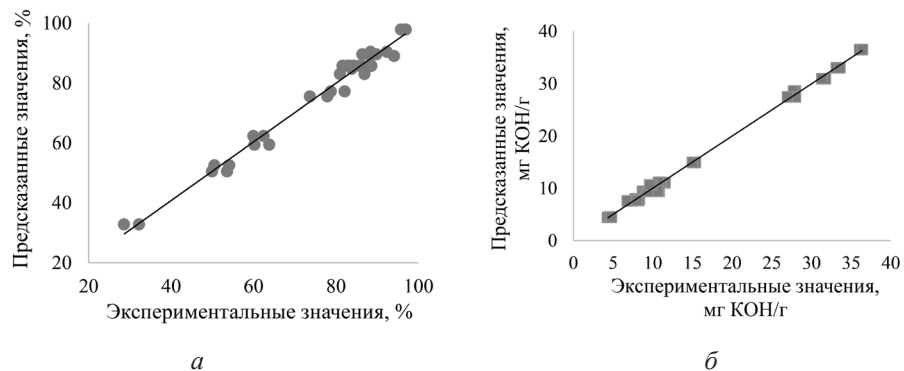


Рис. 1. График зависимости: a – экспериментальной степени омыления от степени омыления, предсказанной моделью Y_1 ; b – экспериментального ЭЧ от ЭЧ, предсказанного моделью Y_2

Fig. 1. The plot of the dependence: a – the experimental degree of saponification on the degree of saponification predicted by the Y_1 model; b – the experimental ester number on the ester number predicted by the Y_2 model

Кроме того, провели анализ остатков регрессии, которые позволяют оценивать ошибки модели. Чем лучше регрессионная модель согласуется с данными, тем меньше величина остатков. На рис. 2 показаны нормальные графики остатков Y_1 и Y_2 . Как видно, большая часть остатков лежит близко к диагональной линии. Это говорит о том, что данные были нормально распределены, а отклонение предсказанных значений от фактических случайно. Если остатки лежат близко к диагональной линии, как показано на рисунке, значит экспериментальные результаты представляют собой точные и достоверные данные [24].

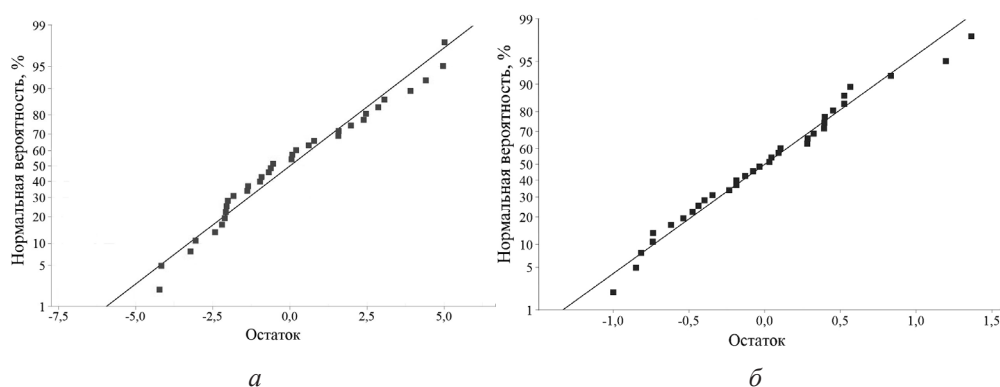


Рис. 2. График нормальной вероятности остатков для моделей Y_1 (a) и Y_2 (b)

Fig. 2. The normal probability plot of residuals for the Y_1 (a) and Y_2 (b) models

Таким образом, анализ всех данных показал, что разработанные модели Y_1 и Y_2 являются значимыми и точными и могут быть применены для построения поверхностей отклика и поиска оптимальных параметров процесса.

Влияние независимых переменных и их взаимодействия оценивали путем построения 3-мерных графиков поверхности отклика, описанных регрессионными моделями Y_1 и Y_2 . Графики отражают влияние любых двух переменных на процесс, в то время как третья переменная остается постоянной на нулевом уровне.

На рис. 3, *a* показано влияние температуры и продолжительности омыления на степень омыления. Установлено, что данные факторы оказывают сильное воздействие на кривизну поверхности отклика. Это согласуется с большими отрицательными значениями связанных с ними квадратичных коэффициентов.

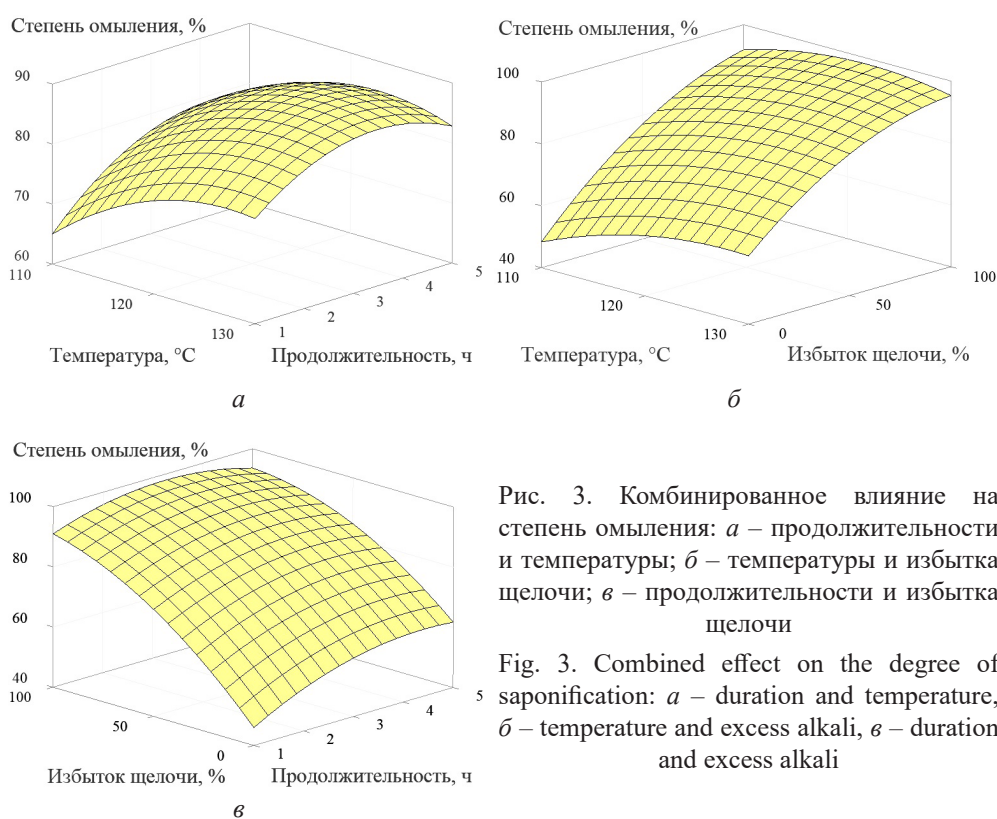


Рис. 3. Комбинированное влияние на степень омыления: *a* – продолжительности и температуры; *б* – температуры и избытка щелочи; *в* – продолжительности и избытка щелочи

Fig. 3. Combined effect on the degree of saponification: *a* – duration and temperature, *б* – temperature and excess alkali, *в* – duration and excess alkali

Хотя влияние более высоких температур и продолжительности положительно, их нельзя увеличивать бесконечно. Когда температура находится в интервале 115...130 °С, степень омыления сначала растет, а затем уменьшается с ростом продолжительности: с увеличением температуры и продолжительности изменяются и даже серьезно повреждаются структуры фитостеринов. Это в конечном итоге приводит к дегидратации фитостеринов и образованию оксистеролов, снижая содержание фитостеринов [14].

График на рис. 3, *б* иллюстрирует значительное воздействие независимых переменных – температуры и избытка щелочи – на процесс омыления, приводящее в область с самой высокой прогнозируемой степенью омыления, которая превышает 95 %. Отсюда предположение: наибольшая степень омыле-

ния будет достигаться только при максимальных уровнях избытка щелочи. При этом в интервале избытка щелочи от 0 до 90 % степень омыления практически не изменятся с ростом температуры.

Поверхность на рис. 3, в аналогична поверхности на рис. 3, б. Существует отрицательное взаимодействие между избытком щелочи и продолжительностью реакции. Отмечено, что средняя продолжительность при высоких концентрациях щелочи приводит к наибольшей степени омыления. При более низком уровне избытка щелочи степень омыления довольно небольшая. Это может быть связано с высокой устойчивостью сложных эфиров фитостерина к омылению.

На графике (рис. 4, а) показано значительное воздействие температуры и продолжительности омыления на ЭЧ при постоянном значении избытка щелочи. С увеличением начальной продолжительности с 1 до 3,6 ч ЭЧ значительно снижается при любой температуре, но затем постепенно возрастает при дальнейшем росте продолжительности.

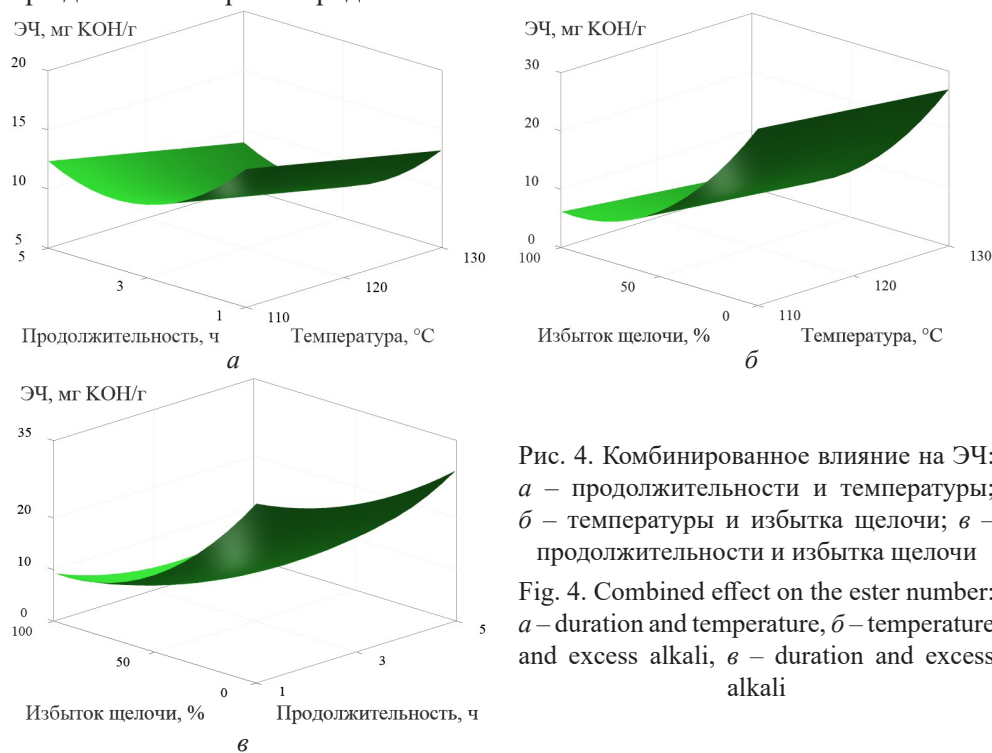


Рис. 4. Комбинированное влияние на ЭЧ: а – продолжительности и температуры; б – температуры и избытка щелочи; в – продолжительности и избытка щелочи
Fig. 4. Combined effect on the ester number: а – duration and temperature, б – temperature and excess alkali, в – duration and excess alkali

На рис. 4, б представлен график влияния температуры и избытка щелочи на ЭЧ при фиксированной продолжительности. Показано, что влияние температуры на ЭЧ оказывается незначительным, в то время как с повышением избытка щелочи ЭЧ резко снижается. При этом минимальные значения ЭЧ получаются в интервале избытка щелочи 80...100 % при высоких температурах.

На графике (рис. 4, в) видно влияние избытка щелочи и продолжительности омыления на ЭЧ. При увеличении избытка щелочи и продолжительности наблюдается значительное снижение ЭЧ. Однако слишком большие избыток щелочи и длительность процесса могут привести к чрезмерному увеличению ЭЧ. Вероятно, это связано не только с возможным образованием гликолевых

эфиров в присутствии щелочи [6], но и с термоокислительной деградацией фитостероинов, в результате которой образуются стерольные димеры, тримеры, а также их олигомеры [21].

Чтобы определить оптимальные условия процесса омыления ТП, использовали метод, основанный на функции желательности Деррингера [16], для оптимизации двух откликов с разными целями. Каждый прогнозируемый и экспериментально полученный отклик Y_i можно преобразовать в функцию желательности d_i от 0 до 1, где $d_i = 0$ представляет полностью нежелательный отклик, а $d_i = 1$ – полностью желаемый, или идеальный, отклик. Индивидуальные оценки желательности объединяются с использованием среднего геометрического для общей желательности D [15], которая оптимизируется для нахождения оптимального набора входных переменных:

$$D = \sqrt[n]{d_1^{r_1} d_2^{r_2} \dots d_n^{r_n}},$$

где r_i – важность каждой переменной по отношению к другим; n – количество откликов.

В зависимости от принятых критериев оптимизации могут быть построены различные функции в пределах приемлемого диапазона значений отклика, заданного как $(U_i - L_i)$, где U_i – верхнее допустимое значение для отклика, а L_i – нижнее [23]. Таким образом, если отклик должен быть максимальным, $d_i(Y_i)$ описывается следующим уравнением:

$$d_i(Y_i(x)) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y_i(x) < L_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - L_i}{U_i - L_i} \right)^s, & \text{если } L_i \leq Y_i(x) \leq U_i \\ 1, & \text{если } Y_i(x) > U_i \end{cases}$$

где s – величина, называемая «весом», определяет, насколько важно, чтобы $Y_i(x)$ была близка к максимуму.

Уравнение для $d_i(Y_i)$, когда его нужно минимизировать, имеет вид

$$d_i(Y_i(x)) = \begin{cases} 1, & \text{если } Y_i(x) < L_i \\ \left(\frac{U_i - Y_i(x)}{U_i - L_i} \right)^t, & \text{если } L_i \leq Y_i(x) \leq U_i \\ 0, & \text{если } Y_i(x) > U_i \end{cases}$$

где t – вес, определяющий, насколько важно, чтобы $Y_i(x)$ была близка к минимуму.

Индивидуальная желательность для каждого отклика достигается путем постановки целей, т. е. минимизации, максимизации или целевого отклика, а также границ, необходимых для каждого отклика. Ограничения, принятые для определения наиболее подходящей общей желательности в данном конкретном исследовании, представлены в табл. 4. Регулируя коэффициенты важности, веса и диапазон откликов в соответствии с определенными целями, можно получить оптимальные условия процесса.

Таблица 4

Параметры оптимизации

| Отклик | Задача | Цель | Вес | Важность |
|--------|-----------------|------|-----|----------|
| Y_1 | Максимизировать | 99,9 | 1 | 2 |
| Y_2 | Минимизировать | 0,1 | 1 | 1 |

Соответствующие расчеты проводили с помощью Minitab 19.1.0. Графики желательности для переменных x_1 , x_2 , x_3 (рис. 5) показали, что температура 121,7 °С, продолжительность 3,18 ч и избыток щелочи 100 % дают оптимальные значения для Y_1 и Y_2 при общей желательности, равной 1.

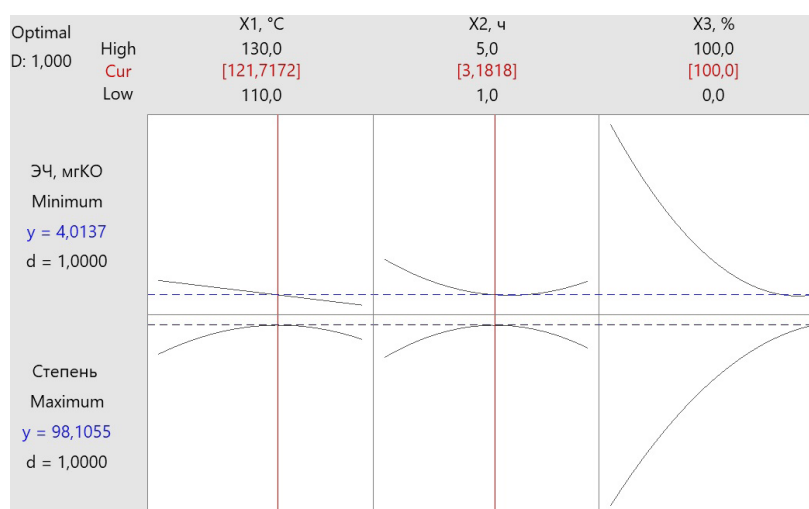


Рис. 5. Графики желательности переменных для максимального отклика степени омыления и минимального ЭЧ в экстракте

Fig. 5. The desirability plots of variables for the maximum response of the degree of saponification and the minimum ester number in the extract

Проверку правильности модели осуществили путем проведения трех параллельных экспериментов в предсказанных оптимальных условиях. Результаты рассчитали как среднее арифметическое значений трех экспериментов и получили степень омыления $98,1 \pm 1,5$ % и ЭЧ $4 \pm 0,1$ мг КОН/г, что было близко к прогнозу. Таким образом, разработанные модели точны и надежны для прогнозирования степени омыления и ЭЧ в экстракте. После оптимизации степень омыления увеличилась на 7,56 отн. % по сравнению со степенью омыления в неоптимизированных условиях (91,2 %).

Заключение

Результаты показали, что переменные процесса, в особенности избыток щелочи, сильно влияют на омыление. Дисперсионный анализ выявил высокие коэффициенты детерминации для степени омыления (0,9791) и эфирного числа (0,9972), тем самым подтверждая соответствие данных регрессионных моделей

экспериментальным. Оптимальные условия (температура – 121,7 °С, продолжительность – 3,18 ч и избыток щелочи – 100 %) процесса омыления обусловили максимальную степень омыления фитостероидов – 98,1 % с минимальным показателем эфирного числа в экстракте – 4 мг КОН/г. Экспериментальные значения в оптимизированных условиях достаточно хорошо коррелировали с прогнозируемыми. Кроме того, оптимизированные условия улучшили степень омыления с 91,2 до 98,1 %, а также позволили снизить температуру и уменьшить время омыления. Полученная информация является фундаментальной и полезна для разработки технологии процесса омыления в целях эффективного производства фитостероидов в больших масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М. и др. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков / под. ред. Б.Д. Богомолова, С.А. Сапотницкого. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с. Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M. et al. *Processing of Sulphate and Sulphite Liquors*. Ed. by B.D. Bogomolov, S.A. Sapotnitskiy. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p.

2. Веденяпина М.Д., Стопп П., Вайхгребе Д., Веденяпин А.А. Применение метода поверхности отклика для изучения адсорбции диклофенака натрия из водных растворов на активированном угле // Химия твердого топлива. 2016. № 4. С. 61–63. Vedenyapina M.D., Vedenyarin A.A., Stopp P., Weichgrebe D. Application of a Response Surface Method to Studying the Adsorption of Diclofenac Sodium from Aqueous Solutions on Activated Carbon. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid Fuel Chemistry], 2016, no. 4, pp. 61–63. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0023117716040113>

3. Гордон Л.В., Скворцов С.О., Лисов В.И. Технология и оборудование лесохимических производств. 5-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 360 с. Gordon L.V., Skvortsov S.O., Lisov V.I. *Technology and Equipment for Chemical Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 360 p.

4. ГОСТ 17823.1–72. Продукты лесохимические. Метод определения кислотного числа: дата введения 1973–07–01. М.: Изд-во стандартов, 1999. 4 с. *State Standard. GOST 17823.1–72. Wood Chemical Products. Method of Acid Number Determination*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 4 p.

5. ГОСТ 5478–2014. Масла растительные и натуральные жирные кислоты. Метод определения числа омыления: дата введения 2016–01–01. М.: Стандартиформ, 2015. 8 с. *State Standard. GOST 5478–2014. Vegetable Oils and Natural Fatty Acids. Method for Determination of Saponification Value*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 8 p.

6. Дымент О.Н., Казанский К.С., Мирошников А.М. Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена. М.: Химия, 1976. 376 с. Dyment O.N., Kazanskiy K.S., Miroshnikov A.M. *Glycols and Other Derivatives of Ethylene and Propylene Oxides*. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 376 p.

7. Исмагилов Р.М. Технология получения новых продуктов на основе таллового пека: дис. ... канд. техн. наук. Нейво-Рудянка, 2004. 125 с. Ismagilov R.M. *Technology for Obtaining New Products Based on Tall Oil Pitch*: Cand. Eng. Sci. Diss. Neyvo-Rudyanka, 2004. 125 p.

8. Исмагилов Р.М., Радбиль А.Б., Радбиль В.А. Пути квалифицированного использования таллового пека // Химия растит. сырья. 2004. № 2. С. 73–76. Ismagilov R.M., Radbil' A.B., Radbil' V.A. Ways of Qualified Use of Tall Oil Pitch. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw material], 2004, no. 2, pp. 73–76.

9. Ключев А.Ю., Скаковский Е.Д., Козлов Н.Г., Прокопчук Н.Р., Латышев И.А. Получение и антисептические свойства состава на основе таллового пека // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. 2016. № 1. С. 82–87. Kliuuev A.Yu., Skakovskiy E.D., Kozlov N.G., Prokopchuk N.R., Latyshevich I.A. Preparation and Antiseptic Properties of the Composition Based on Tall Pitch. *Vesci Nacyanal'naj akademii navuk Belarusi. Serya himichnyh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series], 2016, no. 1, pp. 82–87.
10. Некрасова В.Б., Безбородова Т.Г. Получение и применение биокорректоров питания из биомассы дерева // Изв. СПбЛТА. 2012. № 198. С. 190–201. Nekrasova V.B., Bezborodova T.G. Preparation and Application of Biocorrector Supply from Wood Biomass. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2012, no. 198, pp. 190–201.
11. Некрасова В.Б., Евстигнеев Э.И. Определение оптимальных параметров процесса омыления таллового пека // Изв. вузов. Лесн. журн. 1976. № 4. С. 113–116. Nekrasova V.B., Evstigneyev E.I. Determination of Optimal Parameters of Tall Oil Pitch Saponification. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1976, no. 4, pp. 113–116. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1976/1976-%E2%84%9664.pdf>
12. Овчинников Ю.А. Биоорганическая химия. М.: Просвещение, 1987. 815 с. Ovchinnikov Yu.A. *Bioorganic Chemistry*. Moscow. Prosveshcheniye Publ., 1987. 815 p.
13. Патент 2655444 С1 РФ. МПК C07J 9/00, C07J 75/00. Способ выделения фитостеринов из таллового пека: № 2017131803: заявл. 11.09.2017: опубл. 29.05.2018 / И.Н. Чернов, А.О. Коршунов, Т.И. Долинский, М.А. Лазарев, Е.А. Маврина, И.С. Ильичев, А.Б. Радбиль. Chernov I.N., Korshunov A.O., Dolinskij T.I., Lazarev M.A., Mavrina E.A., Illichev I.S., Radbil A.B. *Method for the Isolation of Phytosterols from Tall Pitch*. Patent RF no. RU 2655444 C1, 2018.
14. Barriuso B., Ansorena D., Astiasaran I. Oxysterols Formation: A Review of a Multifactorial Process. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2017, vol. 169, pp. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2016.02.027>
15. Candiotti L.V., De Zan M.M.D., Cámara M.S., Goicoechea H.C. Experimental Design and Multiple Response Optimization. Using the Desirability Function in Analytical Methods Development. *Talanta*, 2014, vol. 124, pp. 123–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.01.034>
16. Derringer G., Suich R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, 1980, vol. 12, iss. 4, pp. 214–219. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
17. Fernandes P., Cabral J.M.S. Phytosterols: Applications and Recovery Methods. *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98, iss. 12, pp. 2335–2350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.006>
18. Holmbom B., Erä V. Composition of Tall Oil Pitch. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1978, vol. 55, iss. 3, pp. 342–344. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02669926>
19. Laakso P.H. Determination of Plant Stanols and Plant Sterols in Phytosterol Enriched Foods with a Gas Chromatographic-Flame Ionization Detection Method: NMKL Collaborative Study. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 2014, vol. 97, iss. 4, pp. 1097–1108. DOI: <https://doi.org/10.5740/jaoacint.14-011>
20. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley, 2013. 752 p.
21. Rudzinska M., Przybylski R., Zhao Y.Y., Curtis J.M. Sitosterol Thermo-Oxidative Degradation Leads to the Formation of Dimers, Trimers and Oligomers: A Study Using Combined Size Exclusion Chromatography/Mass Spectrometry. *Lipids*, 2010, vol. 45, iss. 6, pp. 549–558. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11745-010-3433-0>

22. Shoichi Y. *Method for Recovering Non-Saponified Product from Tall Oil Pitch and Method for Producing Sterols*. Patent JP no. JP 2002194384 A, 2002.

23. Swamy G.J., Sangamithra A., Chandrasekar V. Response Surface Modeling and Process Optimization of Aqueous Extraction of Natural Pigments from Beta Vulgaris Using Box-Behnken Design of Experiments. *Dyes and Pigments*, 2014, vol. 111, pp. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2014.05.028>

24. Ullah I., Ahmad M.I., Younas M. Optimization of Saponification Reaction in a Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) Using Design of Experiments. *PJEAS*, 2015, vol. 16, pp. 84–92.

25. Zinkel D.F., Russell J. *Naval Stores: Production, Chemistry, Utilization*. New York, Pulp Chemicals Association, 1989. 1060 p.

УДК 676.017.272

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-188-204

КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

*Н.В. Коряковская*¹, канд. техн. наук, доц.;

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6371-6936>

*О.И. Бедердинова*², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [F-3355-2019](https://orcid.org/0000-0002-3664-4276),

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3664-4276>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.koryakovskaya@narfu.ru, o.bederdinova@narfu.ru

²Филиал Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, ул. Капитана Воронина, д. 6, г. Северодвинск, Архангельская обл., Россия, 164520; e-mail: o.bederdinova@narfu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 27.03.20 / Принята к печати 21.06.20

Аннотация. Качество продукции является ключевым индикатором положительного результата работы целлюлозно-бумажных производств. Влажность – один из основных показателей качества бумаги. Рассматривая профиль влажности по ширине бумажного полотна, можно судить о возможных недостатках технологического оборудования, своевременное устранение которых улучшит потребительские свойства бумаги и повысит экономическую эффективность производства. Цель исследования – оценка соответствия результатов измерений влажности требованиям технологического регламента при установившемся и переходном режимах работы бумагоделательной машины, а также однородности профиля влажности в поперечном направлении. Для оценки качества работы автоматизированной системы управления влажностью бумажного полотна обработаны данные со сканирующего устройства при высоком и низком разрешении с помощью статистических методов. Определено, что при установившемся режиме работы бумагоделательной машины влажность соответствует требованиям регламента с доверительной вероятностью 0,95; при переходном режиме работы – превышает верхнюю границу на 6 %. Выявлено, что автоматизированная система управления влажностью устраняет данное нарушение за 340 с. В качестве критерия оценки однородности профиля влажности по ширине бумажного полотна использован коэффициент вариации. Подтверждена гипотеза о наличии линии тренда в профиле влажности по ширине бумажного полотна, и с помощью методов регрессионного анализа получено уравнение линии тренда. При устраненном технологическом факторе, систематически влияющем на однородность, проведено моделирование профиля влажности. Доказано, что устранение недостатка уменьшит коэффициент вариации, а значит улучшит однородность профиля на 41,2 % при установившемся режиме работы бумагоделательной машины. При переходном режиме работы профиль влажности улучшается незначительно. Предложенный алгоритм исследования профиля влажности бумаги, его моделирование после корректирующих воздействий на объект управления могут быть использованы в системах регулирования качества бумаги в поперечном направлении.

Для цитирования: Коряковская Н.В., Бедердинова О.И. Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 188–204. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-188-204

Ключевые слова: влажность бумажного полотна, регулирование влажности, профиль влажности, однородность профиля, линия тренда, качество регулирования, сканирующее устройство, сканы влажности, бумагоделательная машина.

MONITORING AND CONTROL OF PAPER WEB MOISTURE

*Nataliya V. Koryakovskaya*¹, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6371-6936>

*Oksana I. Bederdinova*², *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [F-3355-2019](https://orcid.org/0000-0002-3664-4276), *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3664-4276>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: n.koryakovskaya@narfu.ru

²Branch of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ul. Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164500, Russian Federation; e-mail: o.bederdinova@narfu.ru

Original article / Received on March 27, 2020 / Accepted on June 21, 2020

Abstract. Product quality is a key indicator of the positive outcome of pulp and paper production. Moisture content is one of the main paper quality characteristics. The moisture profile across the paper web width shows possible shortcomings of the process equipment which, if corrected, will improve the consumer properties of paper and enhance economic efficiency. The research aims to assess whether the moisture content measurement results meet the requirements of the process regulations in the steady-state and transient modes of paper machine operation as well as the uniformity of the moisture profile in the cross direction. Data from the scanning device at high and low resolution were processed using statistical methods in order to assess the quality of the automatic paper web moisture control system. It was determined that in the steady-state mode of paper machine operation the moisture content meets the requirements of the regulations with a confidence probability of 0.95; in the transient mode of operation it exceeds the upper limit by 6 %. It has been found that the automated moisture control system eliminates this fault in 340 s. The coefficient of variation was used as a criterion for evaluating the uniformity of the moisture profile across the paper web width. The hypothesis of a trend line in the moisture profile across the paper web width was confirmed and a trend line equation was obtained using regression analysis techniques. The moisture profile was modeled while eliminating the technological factor that systematically affects the uniformity. It is proven that the elimination of the fault will reduce the coefficient of variation and therefore improve the uniformity of the profile by 41.2 % in the steady-state mode of paper machine operation. In the transition mode of operation the moisture profile improves slightly. The proposed algorithm for studying the moisture profile of paper, its modeling after corrections of the control object can be used in systems for controlling the quality of paper in the transverse direction.

For citation: Koryakovskaya N.V., Bederdinova O.I. Monitoring and Control of Paper Web Moisture. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 188–204. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-188-204

Keywords: paper web moisture, moisture control, moisture profile, profile uniformity, trend line, control quality, scanning device, moisture scans, paper machine.

Введение

Процесс производства бумаги является сложным и многосвязным, распределенным во времени и пространстве. Технологические параметры во многих случаях обладают свойством взаимного влияния, что усложняет регулирование. Так, например, важный показатель качества – массу 1 м^2 бумажного полотна – корректируют изменением расхода массы в напорный ящик, что в свою очередь изменяет влажность бумаги. В настоящее время потребителя интересует не только выполнение требований регламента по средним значениям основных показателей качества бумаги, но и однородность показателей по ширине полотна [7, 13]. В работах [4, 15] исследованы методы оценки неоднородности просвета и ее влияние на печатные свойства. Авторы публикаций [1, 10] аргументируют важность контроля и регулирования профиля массы 1 м^2 бумажного полотна. Неравномерный профиль свидетельствует о перерасходе волокна, негативно влияет на качество просвета и механические характеристики.

Для влажности однородность профиля – это минимальный разброс количественных значений показателя относительно среднего значения по ширине полотна. Регулирование влажности осуществляют в сушильной части бумагоделательной машины (БДМ). Процесс сушки является самым энергозатратным, потребляющим 75 % тепловой энергии от всего процесса производства бумаги [2, 3, 18]. Излишнее пересушивание бумаги соответствует отрицательным отклонениям от среднего значения влажности, приводит к ухудшению качества продукции и перерасходу пара.

Исследованиям в области регулирования температурного режима сушки и влажности бумажного полотна по длине посвящено много работ [2, 3, 5, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 21–26]. Следует выделить исследования Гринченко И.А. [2], Жученко А.И. [3], Akesson J. [8], Stenström S. [25], предлагающие математические модели температурного режима сушки при нормальном режиме работы БДМ с целью оптимизации расхода пара и уменьшения брака в случае выхода влажности за пределы технологического регламента.

Авторы [16, 21, 26] исследовали градиент профиля влажности по толщине полотна. Актуальность аргументирована необходимостью оптимизации энергозатрат в процессе сушки, улучшения механических свойств бумаги и уменьшения случаев брака продукции. В источнике [9] приведены математические модели градиентов влажности по толщине и даны рекомендации по технологии сушки бумаги с различной массой 1 м^2 .

Цель исследований – оценка однородности профиля влажности в поперечном направлении бумажного полотна и соответствия результатов измерений требованиям технологического регламента при установившемся и переходном режимах работы БДМ. Отличительной особенностью проведенных работ является характеристика влажности не только по длине полотна, но и по ширине профиля. Исследование актуально, т. к. может помочь улучшить качество продукции, ее потребительские свойства, снизить количество брака и оптимизировать энергозатраты.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – бумажное полотно. Предмет – качество регулирования влажности бумажного полотна в продольном и поперечном направлениях, а также однородность профиля в поперечном направлении. Методы – статистический и регрессионный анализ экспериментальных данных.

Данные о влажности получены с измерительного сканирующего устройства, входящего в состав автоматизированной системы управления качеством бумаги на БДМ-4 АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат».

Результаты измерений – сканы влажности по ширине бумажного полотна. Интервал времени между сканами составляет 17 с. Анализировали результаты измерений за 34 мин в количестве 120 сканов в высоком и низком разрешении. Обрезная ширина бумажного полотна – 4200 мм. Скан высокого разрешения содержит 420 значений влажности по ширине полотна, скан низкого разрешения – 42 значения.

На рис. 1 представлен профиль влажности в поперечном направлении бумажного полотна при высоком и низком разрешениях сканера.

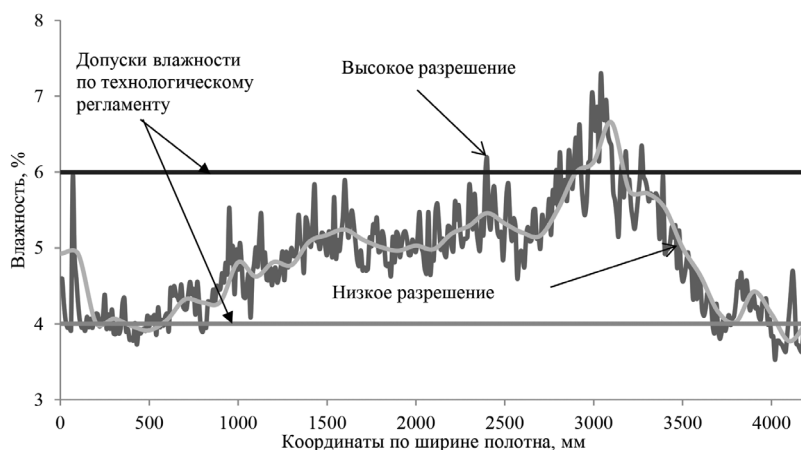


Рис. 1. Профиль влажности по ширине бумажного полотна при высоком и низком разрешениях сканера

Fig. 1. Moisture profile across the paper web width at high and low scanner resolutions

Измерения влажности проводили при переходном режиме работы БДМ, а именно при работе машины в режиме смены сорта продукции. Результаты измерений: 94 скана – данные о влажности бумаги с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 2,3 \text{ г}$, 26 сканов – с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$. Согласно технологическому регламенту, влажность в обоих случаях должна находиться в пределах 4...6 %.

На рис. 2 показан тренд поверхностной плотности бумаги в машинном направлении. Линия тренда представляет собой ступенчатую функцию. В момент времени $t = 1581 \text{ с}$ масса $1 \text{ м}^2 m = 59,2 \pm 1,8 \text{ г}$. В следующий дискретный момент времени $t = 1598 \text{ с}$ $m = 100,4 \pm 2,5 \text{ г/м}^2$. Переход на новый сорт бумаги происходит в течение 17 с.

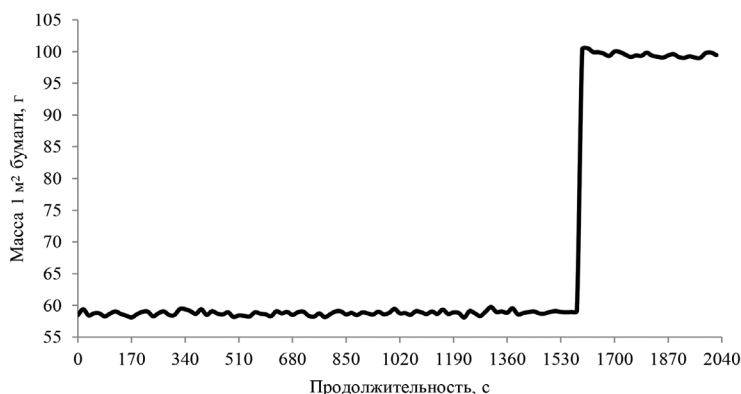


Рис. 2. Переходный режим смены сорта бумаги

Fig. 2. Transition mode for paper grade changing

Увеличение массы 1 м² бумаги осуществляется за счет увеличения влажности вследствие роста расхода массы из напорного ящика на сетку БДМ. Система управления качеством построена по принципу инвариантности [5]: при поступлении задания на смену сорта бумаги в систему автоматизированного регулирования влажности идет корректирующее воздействие, увеличивающее давление пара в сушильных цилиндрах для повышения температуры их поверхности с целью стабилизации влажности до рабочих значений 4...6 %.

Алгоритм проведения исследований приведен на рис. 3 в виде функциональной модели по нотации BPMN. Для исследования качества регулирования влажности в машинном направлении необходимо решить следующие задачи:

установить закон распределения экспериментальных данных;

в случае нормального закона распределения определить: среднее значение, стандартное отклонение и допустимые границы влажности с доверительной вероятностью (P) 0,95.

Для исследования качества регулирования влажности в поперечном направлении требуется:

оценить однородность дисперсий и средних значений влажности при разных объемах выборки;

оценить однородность профиля влажности по ширине бумажного полотна; выявить наличие систематической составляющей (линии тренда) в колебательной характеристике профиля влажности по ширине бумажного полотна.

Нормальность закона распределения экспериментальных данных устанавливаются путем сравнения стандартных отклонений σ_1 и σ_2 , вычисленных по разным формулам.

Формула Бесселя имеет вид

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}},$$

где n — объем выборки (число сканов); v_i — i -е значение остаточного отклонения, $i = 1 \dots n$.

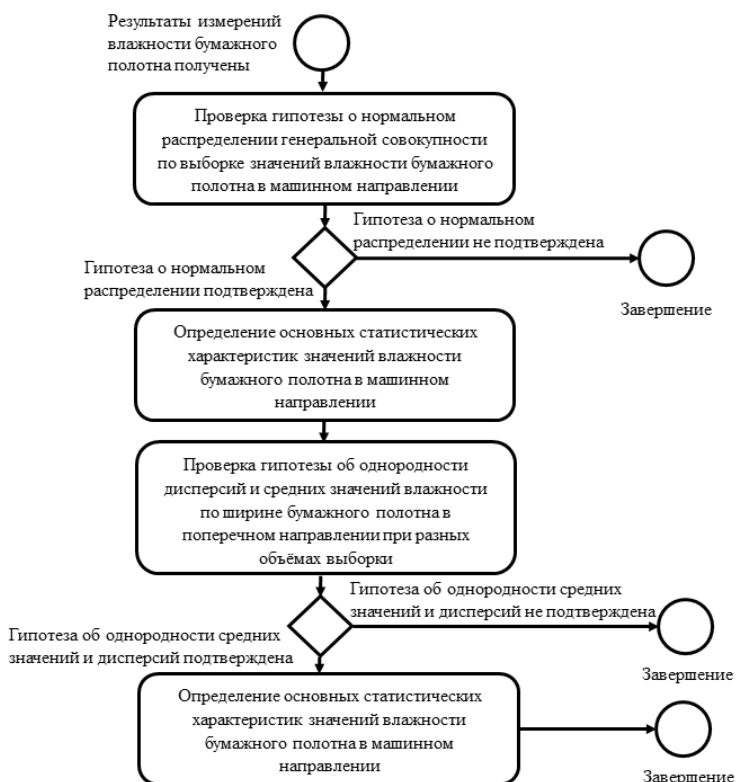


Рис. 3. Модель проведения исследований качества регулирования влажности бумажного полотна

Fig. 3. Model for carrying out studies on quality of paper web moisture control

Остаточное случайное отклонение v_i средней влажности $u_{срi}$ в поперечном направлении определяется по формуле

$$v_i = u_{срi} - \bar{x},$$

где \bar{x} – средняя влажность в машинном направлении.

Средние значения влажности в поперечном направлении для разных разрешений сканера находятся так:

$$u_{срi} = \frac{\sum_{j=1}^N u_j}{N},$$

где N – объем выборки (количество значений параметра в одном скане: для высокого разрешения $N = 420$, для низкого $N = 42$); u_j – влажность по ширине полотна.

Средняя влажность \bar{x} в машинном направлении вычисляется следующим образом:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n u_{срi}}{n}.$$

Формула стандартного отклонения для нормального распределения случайной дискретной величины имеет вид

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1,5707}{n(n-1)}} \cdot \sum_{i=1}^n |v_i|.$$

Если стандартные отклонения σ_1 и σ_2 отличаются меньше чем на 10 %, значит, результаты измерения влажности подчиняются нормальному закону распределения.

Для проверки статистической гипотезы об однородности двух дисперсий используют F -критерий Фишера [20].

Вначале вычисляют $F_{\text{расч}}$, равный отношению большей из выборочных дисперсий к меньшей:

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_1^2}{s_2^2},$$

где s_1^2, s_2^2 – выборочные дисперсии.

Далее по уровню значимости q и степеням свободы дисперсий числителя и знаменателя f_1 и f_2 таблиц распределения Фишера находят $F = F_{\text{табл}}$.

Степени свободы определяют по формулам:

$$\begin{aligned} f_1 &= n_1 - 1; \\ f_2 &= n_2 - 1, \end{aligned}$$

где n_1, n_2 – объемы соответствующих выборок.

Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, можно принять гипотезу об однородности дисперсий.

Для проверки гипотезы об однородности средних результатов измерений в случае однородности дисперсий вычисляют расчетное t -отношение по формуле [6]

$$t_{\text{расч}} = \frac{|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \left[\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}}. \quad (1)$$

Из таблиц распределения Стьюдента при уровне значимости q и числе степеней свободы $f = n_1 + n_2 - 2$ находят табличное значение $t_{\text{табл}}$. Если $t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$, то можно принять гипотезу об однородности средних значений.

В качестве оценки неоднородности профиля влажности по ширине полотна будем использовать коэффициент вариации

$$C_v = \frac{s}{u_{\text{ср}}} \cdot 100 \%,$$

где s – стандартное отклонение.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты обработки экспериментальных данных для оценки качества регулирования влажности бумажного полотна в машинном направлении.

Стандартные отклонения σ_1 и σ_2 отличаются меньше чем на 10 % для двух сортов бумаги при разных разрешениях сканирующего устройства, следовательно, результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения,

а их статистическую оценку можно произвести с помощью таких показателей, как среднее значение, стандартное отклонение и доверительный интервал.

По результатам расчетов, представленных в табл. 1, для бумаги с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 3 \text{ г}$ доверительные границы значений влажности $4,5 \leq u \leq 5$ при $P = 0,95$. Как следует из табл. 1, максимальное и минимальное значения не выходят за установленные пределы.

Следовательно, автоматизированная система управления влажностью бумажного полотна удовлетворяет требованиям регламента, диапазон колебаний находится в средней части установленных границ.

Таблица 1

Результаты расчета основных статистических характеристик

| Показатель | Сорт бумаги, требования к качеству по технологическому регламенту БДМ-4 | | | |
|---|---|--------|--|--------|
| | Бумага офсетная, масса $1 \text{ м}^2 60 \pm 3 \text{ г}$, влажность – 4...6 % | | Бумага офсетная, масса $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$, влажность – 4...6 % | |
| Разрешение сканера | Высокое | Низкое | Высокое | Низкое |
| Объем выборки | 94 | 94 | 26 | 26 |
| Средняя влажность, % | 4,692 | 4,688 | 5,423 | 5,453 |
| Стандартное отклонение по формуле Бесселя | 0,113 | 0,114 | 0,563 | 0,567 |
| Стандартное отклонение по формуле нормального распределения | 0,115 | 0,115 | 0,586 | 0,588 |
| Отличие σ_1 от σ_2 , % | 1,063 | 1,379 | 4,040 | 3,772 |
| Табличное значение t -критерия Стьюдента | 1,986 | 1,986 | 2,056 | 2,056 |
| Минимально допустимая влажность при $P = 0,95$ | 4,467 | 4,461 | 4,265 | 4,287 |
| Максимально допустимая влажность при $P = 0,95$ | 5,035 | 5,039 | 6,545 | 6,558 |
| Максимальная влажность в машинном направлении | 5,035 | 5,039 | 6,545 | 6,558 |
| Минимальная влажность в машинном направлении | 4,466 | 4,480 | 4,692 | 4,703 |

Для бумаги с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$ доверительные границы значений влажности $4,265 \leq u \leq 6,545$ при $P = 0,95$. Максимальное и минимальное значения, как видно из табл. 1, попадают в доверительный интервал, однако верхняя граница интервала выходит за пределы, установленные технологическим регламентом.

На рис. 4 представлен тренд средней влажности для высокого и низкого разрешения сканера. От 0 до 1598 с тренд соответствует влажности бумаги с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 3 \text{ г}$. Остальная часть тренда отображает качество бумаги с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$.

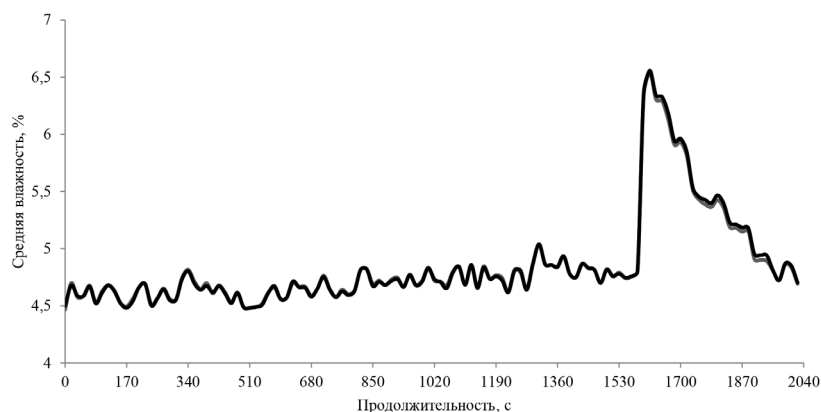


Рис. 4. Тренд средней влажности бумажного полотна в машинном направлении

Fig. 4. The trend line of the average moisture content of paper web in the machine direction

Из рис. 4 видно, что за 340 с система управления влажностью возвращает регулируемый параметр в заданные границы. Таким образом, в течение 340 с производится бумага, удовлетворяющая требованиям технологического регламента по массе 1 м^2 (рис. 2), но ее влажность значительно превышает предельные границы. Рабочая скорость БДМ 350 м/мин, следовательно, при переходном режиме работы производится 0,5 т бракованной бумаги.

Для исследования равномерности профиля влажности по ширине полотна было решено использовать данные низкого разрешения. Чтобы убедиться в однородности измерительной информации выборок разного объема, проверены гипотезы об однородности дисперсий и средних значений по методикам, упомянутым выше.

На рис. 5 изображен тренд расчетного значения F -критерия Фишера. Из графика следует, что для 112 выборок из 120 выполняется условие $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$. Для данных выборок можно принять гипотезу об однородности дисперсий.

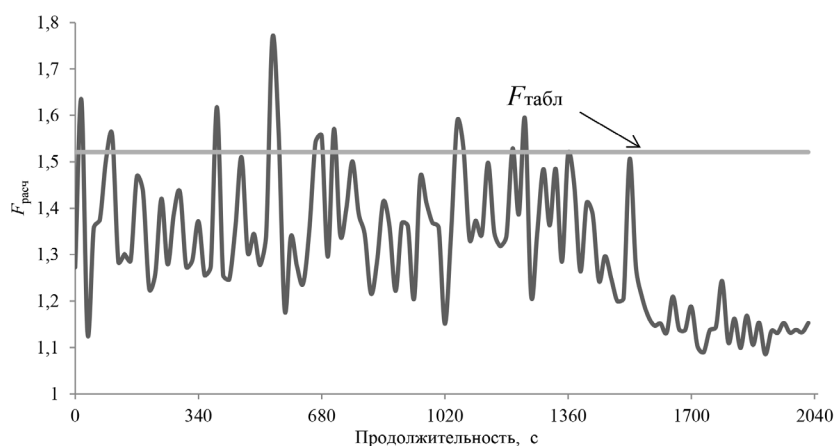


Рис. 5. Расчетные значения F -критерия Фишера

Fig. 5. The calculated values of the F -test

В целях проверки однородности средних значений по формуле (1) определены значения t -критерия Стьюдента $t_{\text{расч}}$. Так как $t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$ для всех результатов наблюдений (рис. 6), можно принять гипотезу об однородности средних значений. Средняя влажность при высоком и низком разрешениях практически одинакова (см. рисунок 4).

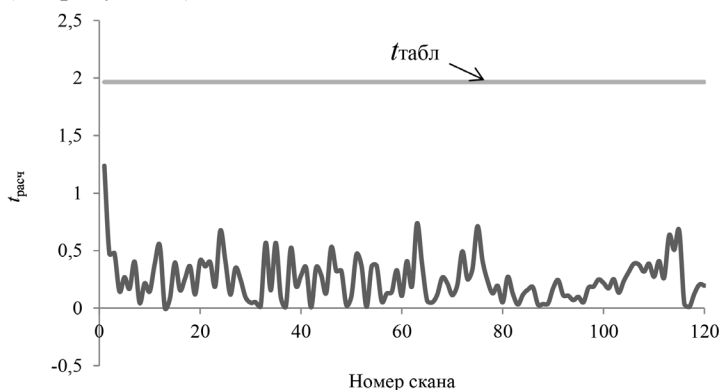


Рис. 6. Расчетные значения t -критерия Стьюдента

Fig. 6. The calculated values of the t -test

Определенные значения коэффициента вариации профиля влажности бумажного полотна при установившемся и переходном режимах работы БДМ представлены на рис. 7.

Резкое ухудшение однородности профиля влажности наблюдается при переходном режиме работы БДМ. В соответствии с графиком (рис. 7), коэффициент вариации по окончании переходного процесса должен вернуться к значениям установившегося режима работы БДМ — $8,5 \pm 1,6$ %.



Рис. 7. Оценка однородности профиля влажности бумажного полотна при установившемся и переходном режимах работы БДМ

Fig. 7. Evaluation of the paper web moisture profile uniformity during the steady-state and transient modes of paper machine operation

Для исследования тренда колебаний влажности по ширине полотна выбраны 15 массивов результатов измерений низкого разрешения из 112 сканов, в которых соблюдается однородность дисперсий и средних значений влажности.

9 сканов соответствуют установившемуся режиму работы БДМ, бумаге с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 2_3 \text{ г}$, 6 сканов – переходному режиму работы, бумаге с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$.

При построении графиков влажности по ширине полотна наблюдалась линия тренда на всех случайно выбранных сканах влажности (рис. 8).

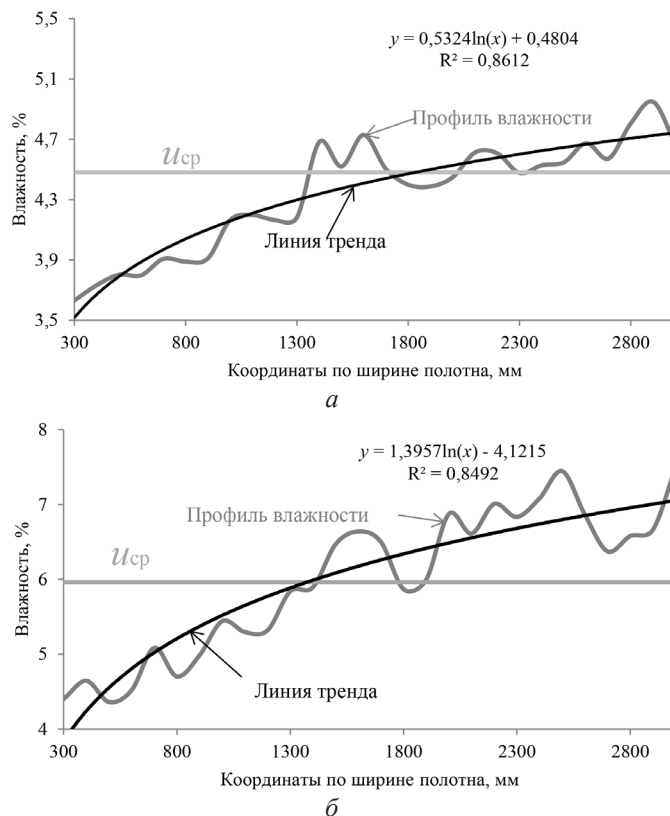


Рис. 8. Профиль влажности при установившемся (а) и переходном (б) режимах работы БДМ

Fig. 8. Moisture profile during the steady state (a) and transient (b) modes of paper machine operation

Для всех исследуемых профилей характерно, что средняя влажность достигается после координаты по ширине полотна 1300 мм.

Регрессионная модель линии тренда имеет вид

$$y = C \ln(x) + B, \quad (2)$$

где C – коэффициент; x – координата по ширине полотна; B – свободный член функции.

На основании результатов аппроксимации (табл. 2) построены зависимости коэффициента C и свободного члена логарифмической функции B уравнения линии тренда от средней влажности (см. рис. 8, а, б соответственно).

Таблица 2

Результаты аппроксимации линии тренда

| Среднее значение влажности, % | Коэффициент C | Свободный член | Достоверность аппроксимации |
|-------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------|
| 4,498 | 0,4739 | 0,9809 | 0,7537 |
| 4,678 | 0,5736 | 0,4014 | 0,8520 |
| 4,643 | 0,5081 | 0,8260 | 0,7589 |
| 4,481 | 0,5324 | 0,4804 | 0,8612 |
| 4,803 | 0,5416 | 0,7931 | 0,7926 |
| 4,606 | 0,4905 | 0,9664 | 0,7685 |
| 4,392 | 0,4622 | 1,2622 | 0,6124 |
| 4,864 | 0,4657 | 1,3978 | 0,6985 |
| 4,818 | 0,5741 | 0,5840 | 0,8045 |
| 6,558 | 1,5917 | -5,0111 | 0,7843 |
| 5,962 | 1,3957 | -4,1215 | 0,8492 |
| 5,848 | 1,0421 | -1,8335 | 0,8335 |
| 5,453 | 0,9547 | -1,4748 | 0,7892 |
| 5,212 | 0,9714 | -1,8985 | 0,8440 |
| 4,872 | 0,8203 | -1,0235 | 0,8403 |

Коэффициент корреляции для C и средней влажности равен 0,962 (рис. 9) и является статистически значимым. Уравнение парной линейной регрессии для коэффициента определяется формулой

$$C = 0,535u_{\text{cp}} - 1,952.$$

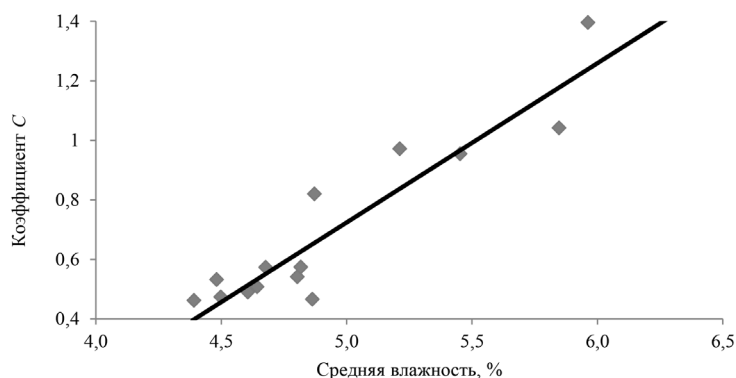


Рис. 9. Зависимость коэффициента C уравнения линии тренда от средней влажности

Fig. 9. The dependence of the C coefficient of the trend line equation on the average moisture content

Коэффициент корреляции между свободным членом функции B и средней влажностью равен $-0,937$ (рис. 10) и является статистически значимым.

Уравнение парной линейной регрессии для свободного члена функции B находится по выражению

$$B = -2,885u_{\text{cp}} + 14,130.$$

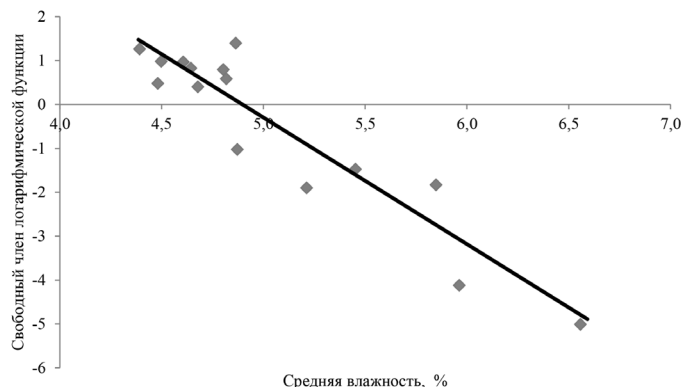


Рис. 10. Зависимость коэффициента B уравнения линии тренда от среднего значения влажности

Fig. 10. The dependence of the B coefficient of the trend line equation on the average moisture content

Функция тренда, описываемая уравнением (2), примет вид

$$y(x) = (0,535u_{\text{ср}} - 1,952) \ln x - 2,885u_{\text{ср}} + 14,130. \quad (3)$$

Ранее было отмечено, что для всех исследуемых профилей характерно достижение средней влажности после координаты 1300 мм. Это говорит о систематическом воздействии на профиль влажности со стороны технологического процесса.

Проверим наличие данной проблемы, приравняв правую часть уравнения (3) к $u_{\text{ср}}$:

$$u_{\text{ср}} = (0,535u_{\text{ср}} - 1,952) \ln x - 2,885u_{\text{ср}} + 14,130. \quad (4)$$

Решение данного уравнения имеет вид

$$X_{u_{\text{ср}}} = e^{\frac{3,885u_{\text{ср}} - 14,130}{0,535u_{\text{ср}} - 1,952}},$$

где $X_{u_{\text{ср}}}$ – координата достижения линией тренда значения средней влажности, мм.

Определенные $X_{u_{\text{ср}}}$ по ширине бумажного полотна в соответствии с выражением (4) и данными табл. 2 представлены на рис. 11.

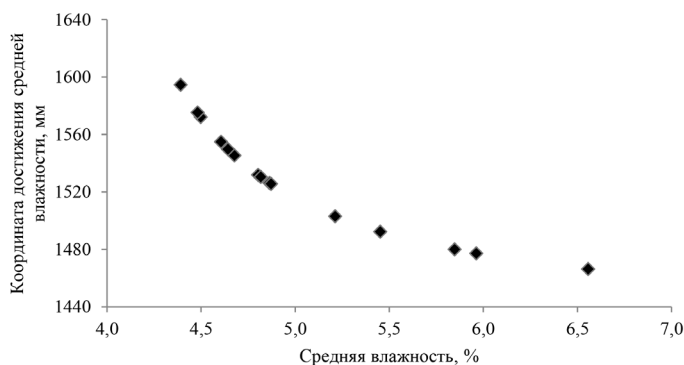


Рис. 11. Значения координаты достижения средней влажности по ширине бумажного полотна

Fig. 11. The values of the coordinate of achieving the average moisture content across the paper web width

По результатам статистической обработки данных, среднее значение $X_{u_{cp}}$ составляет 1528 мм, коэффициент вариации – 2,1 %.

Можно сделать выводы:

чем меньше средняя влажность, тем больше координата достижения среднего значения;

средняя влажность достигается после 1440 мм от края полотна;

коэффициент вариации 2,1 % говорит о малых отличиях значений $X_{u_{cp}}$;

определение координаты $X_{u_{cp}}$ поможет установить область технологического процесса, вызывающую появление тренда в профиле влажности.

Моделирование результатов устранения возмущающего воздействия, систематически влияющего на неравномерность профиля влажности по ширине бумажного полотна, проведено по формуле

$$\tilde{u}(x) = u(x) - y(x) + u_{cp},$$

где $\tilde{u}(x)$ – результат измерения влажности в точке x после устранения влияния возмущения; $u(x)$ – исходный результат измерения влажности в точке x ; $y(x)$ – значение функции тренда в точке x .

На рис. 12 представлены результаты моделирования.



Рис. 12. Результаты моделирования профиля влажности бумаги после устранения влияния технологического фактора

Fig. 12. The modeling results of the paper moisture profile after elimination of the influence of the technological factor

Результаты моделирования (рис. 13) наглядно демонстрируют улучшение однородности профиля влажности бумаги после устранения систематического возмущающего воздействия. Разброс влажности относительно среднего значения сокращается.

Для количественной оценки улучшения однородности профиля проведен расчет коэффициентов вариации для 15 сканов влажности (табл. 2). На рис. 13 показаны графики значений коэффициента вариации для 15 сканов влажности до и после устранения влияния технологического фактора.

В соответствии с этими результатами можно сделать следующие выводы:

устранение возмущающего воздействия позволит приблизительно в 2 раза снизить коэффициент вариации при установившемся режиме работы БДМ: с 8,4 до 4,9 % – уменьшение на 41 %;

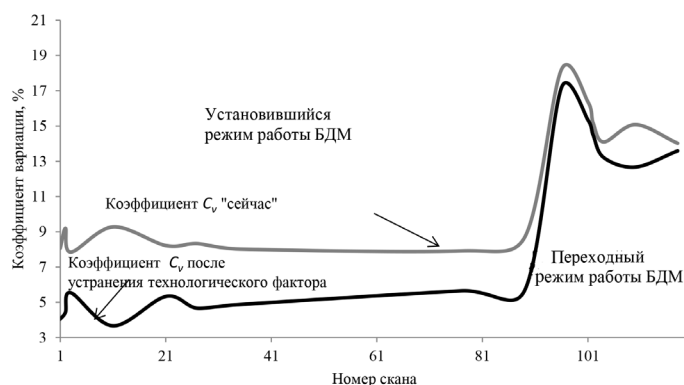


Рис. 13. Эффект улучшения однородности профиля влажности после устранения систематического возмущающего воздействия

Fig. 13. The effect of improving the uniformity of the moisture profile after eliminating the systematic disturbance

при переходном режиме работы БДМ снижение коэффициента вариации после устранения возмущающего воздействия будет незначительным: с 15,5 до 14,4 %, уменьшение на 7,0 %.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что автоматизированная система управления качеством бумаги при переходе на новый сорт продукции переходит на новый установившийся режим по поверхностной плотности через 17 с после начала процесса; по влажности – через 340 с. За это время вырабатывается приблизительно 0,5 т бракованной продукции. Большая инерционность канала управления влажностью объясняется физическими процессами, происходящими в сушильной части бумагоделательной машины. Доказано, что автоматизированная система управления влажностью бумаги поддерживает заданное регламентом значение регулируемого параметра в допустимых пределах при нормальном режиме работы бумагоделательной машины. Установлены однородности средних значений и дисперсий для массивов данных высокого и низкого разрешений сканера, что говорит об их одинаковой информативности. Выявлено наличие систематического возмущающего воздействия, которое не зависит от автоматизированной системы управления влажностью, а связано с технологическим оборудованием. Моделирование профиля влажности до и после устранения этого воздействия показало возможность улучшения однородности профиля влажности производимой на бумагоделательной машине БДМ-4 в АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат» бумаги на 41,2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахтин А.В., Слюта М.О. Сравнительный анализ использования математической и нейронной модели в системе управления поперечным профилем бумажного полотна // Матрица научного познания. 2018. № 12. С. 22–24. Bakhtin A.V., Slyuta M.O. Comparative Analysis of Using Mathematical and Neural Models in Control System of Paper Web Transverse Profile. *Matritsa nauchnogo poznaniya*, 2018, no. 12, pp. 22–24.

2. Гринченко И.А., Пожитков В.В., Жукова Ю.С. Совершенствование систем управления процессом сушки бумаги // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. № 01. С. 80–81. Grinchenko I.A., Pozhitkov V.V., Zhukova Yu.S. Improvement of Paper Drying Control Systems. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2009, no. 01, pp. 80–81.
3. Жученко А.И., Черёпкин Е.С. Постановка задачи оптимального управления процессом прогрева бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины // Автоматизация технологических и бизнес-процесов. 2015. Vol. 7, iss. 1. С. 25–31. Zhuchenko A.I., Cheryopkin E.S. Problem Statement for Optimal Control of Paper Web Heating in the Drying Part of a Paper Machine. *Avtomatizatsiya tekhnologichnikh i biznes-protsesiv*, 2015, vol. 7, iss. 1, pp. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.21/2015.42859>
4. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Моделирование структуры бумажного листа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 160–172. Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Paper Sheet Texture Simulation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 2, pp. 160–172. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.160>
5. Леонтьев В.Н., Ваганов В.В. Основы метода анализа динамических свойств систем автоматического регулирования. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. 225 с. Leont'yev V.N., Vaganov V.V. *Fundamentals of the Method for Analysis of Dynamic Properties of Automatic Control Systems*. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2017. 225 p.
6. Орлов А.И. Проверка статистической гипотезы однородности математических ожиданий двух независимых выборок: критерий Крамера-Уэлча вместо критерия Стьюдента // Науч. журн. КубГАУ. 2015. № 110(06). С. 197–218. Orlov A.I. Statistical Hypothesis Testing of Homogeneity of Mathematical Expectations of Two Independent Samples: Cramer-Welch Test Instead of *t*-Test. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2015, no. 110(06), pp. 197–218.
7. Сиваков В.П., Вураско А.В., Минакова А.Р. Влияние колебаний массы бумажного полотна на качество товарной продукции // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38). С. 133–138. Sivakov V.P., Vurasko A.V., Minakova A.R. Influence of Paper Cloth Mass Fluctuations on the Quality of Commercial Products. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2(38), pp. 133–138. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-133-138>
8. Åkesson J., Ekvall J. *Parameter Optimization of a Paper Machine Model*. Paper Presented at Reglermöte. Stockholm, Lund University, 2006. 7 p.
9. Batchelor W.J., Wu Z., Johnston R.E. Measurement of z-Direction Moisture Transport and Shrinkage in the Drying of Paper. *Proceedings of 56 Appita Annual Conference*. Melbourne, Appita Inc., 2002, pp. 111–117.
10. Brinkmann D., Pound C. Sonoco Verifies CD Profile Control Using Advanced Statistical Analysis Method. *Pulp & Paper*, 2003, vol. 77, no. 5, p. 54.
11. Forughi A.F., Green S.I., Stoeber B. Optical Transparency of Paper as a Function of Moisture Content with Applications to Moisture Measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, iss. 2, art. 023706. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4942251>
12. Hallajisani A., Shahbeig H., Hashemi S.J., Murray Douglas W.J. An Experimental Simulation Model for Coated Paper Drying. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2013, vol. 30, no. 3, pp. 563–573 DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322013000300014>
13. Harrmann M., Schulz S. Convective Drying of Paper Calculated with a New Model of the Paper Structure. *Drying Technology*, 2007, vol. 8, iss. 4, pp. 667–703. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373939008959910>
14. Haslach Jr. H.W. The Moisture and Rate-Dependent Mechanical Properties of Paper: A Review. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2000, vol. 4, iss. 3, pp. 169–210. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009833415827>
15. Ikeda T. Appearance Quality Inspection System for Paper Making Industry. *JFE Technical Report*, 2016, no. 21, pp. 161–167.

16. Keränen J., Paaso J., Timofeev O., Kiiskinen H. Moisture and Temperature Measurement of Paper in the Thickness Direction. *Appita*, 2009, vol. 62, iss. 4, pp. 308–313.
17. Koedudom T., Yoiod P. Paper Moisture Content Determination from Microwave Reflection Measurement. *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. Phuket. 2017, pp. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISANP.2017.8228951>
18. Kong L., Liu H. A Static Energy Model of Conventional Paper Drying for Multicylinder Paper Machines. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, iss. 3, pp. 276–296. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.635253>
19. Kouko J., Retulainen E., Kekko P. Straining and Relaxation Properties of Wet Paper during Heating. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2014, vol. 18, iss. 4, pp. 697–719. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9246-4>
20. Lemeshko B.Y., Lemeshko S.B., Semenova M.A. On Application of k-Samples Homogeneity Tests. *Applied Methods of Statistical Analysis. Statistical Computation and Simulation, AMSA'2019: Proceedings of the International Workshop*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019, pp. 138–151.
21. Lindner M. Factors Affecting the Hygroexpansion of Paper. *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53, pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1358-1>
22. Lovikka V.A., Rautkari L., Maloney T.C. Changes in the Hygroscopic Behavior of Cellulose Due to Variations in Relative Humidity. *Cellulose*, 2018, vol. 25, pp. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1570-9>
23. Pakarinen P., Kiiskinen H., Kekko P., Paltakari J. Drying and Paper Quality. Ch. 7. *Papermaking Part 2, Drying*. Ed. by M. Karlsson. Helsinki, Paperi ja Puu Oy, 2010, pp. 236–295.
24. Sigifredo N., Guillemette M., Emmond G., Ball J. Canfor Achieves Better Moisture Control, Quality with New Loop Tuning Strategy. *Pulp & Paper*, 2003, vol. 77, no. 6, pp. 42–46.
25. Stenström S. Drying of Paper: A Review 2000–2018. *Drying Technology*, 2019, vol. 38, iss. 7, pp. 825–845. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1596949>
26. Yogi R.A., Parolia R.S., Karekar R.N., Aiyer R.C. Microwave Microstrip Ring Resonator as a Paper Moisture Sensor: Study with Different Grammage. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, iss. 10, pp. 1558–1562. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/10/308>