

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

2/380

2021

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)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф., акад. РАЕ (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
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)
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)
Сёрensen 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)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

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

2/380

2021

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof., Academician of the Russian Academy of Natural History (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
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 Sciences, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
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

- П.П. Попов, М.Н. Казанцева, С.П. Арефьев.* Фенотипическая структура популяций ели на Европейском Севере России..... 9
- S.S. Makarov, I.B. Kuznetsova, A.I. Chudetsky, S.A. Rodin.* Obtaining High-Quality Planting Material of Forest Berry Plants by Clonal Micropropagation for Restoration of Cutover Peatlands..... 21
- С.Н. Тарханов, Е.А. Пинаевская, Ю.Е. Аганина.* Особенности адаптации разных форм сосны обыкновенной в условиях длительного избыточного увлажнения почв..... 30
- А.В. Данчева, В.К. Панкратов.* Оценка эффективности рубок ухода в сухих сосняках Казахского мелкосопочника..... 45
- С.Н. Горошкевич.* Метеорологическая обусловленность семеношения кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour)..... 56
- В.Г. Суховольский, В.И. Воронин, В.А. Осколков, А.В. Ковалев.* Экспресс-оценка физиологического состояния древесных растений по диэлектрическим характеристикам тканей ствола..... 70
- И.Н. Кутявин, А.В. Манов, А.Ф. Осипов, М.А. Кузнецов.* Строение древостоев северотаежных сосняков..... 86
- В.М. Мамедалиева.* Алгоритм и оценка изменения площади лесного покрова Хачмазского района Азербайджана средствами космического мониторинга..... 106

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- С.М. Базаров, Ю.И. Беленький, С.А. Угрюмов, Ф.В. Свойкин, В.Ф. Свойкин.* Системный анализ технологической эффективности колесного сортиментоподборщика..... 116
- С.Е. Арико, С.А. Войнаш, Д.А. Кононович, В.А. Соколова.* Мощностные характеристики узлов мульчера при удалении древесно-кустарниковой растительности..... 130

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- Ю.Г. Скурыдин, Е.М. Скурыдина, Р.Г. Сафин, А.Р. Хабибуллина.* Физико-механические характеристики термодревесной композиции из древесины сосны при баротермической обработке..... 143

-
- Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, Е.А. Памфилов, А.Я. Данилюк, В.В. Капустин.*
Повышение работоспособности древесно-металлических подшипников
скольжения лесопромышленных машин..... 156

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- В.П. Сиваков, А.В. Вураско, Н.В. Куцубина.* Экспериментальное и теоретическое
исследование тепловых потерь в сушильных цилиндрах..... 169
- С.В. Анискин, В.С. Куров.* Динамические характеристики скорости истечения
жидкости из форсунок в струйных газопромывателях целлюлозного произ-
водства..... 180
- Н.А. Макаревич.* Фактор неидеальности в энтропийно-мультифрактальном ана-
лизе самоорганизованных структур растительных полимеров (лигнинов).... 194

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- Р.В. Котельников, А.А. Мартынюк.* Показатель для оценки эффективности орга-
низации охраны лесов от пожаров..... 213
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>P.P. Popov, M.N. Kazantseva, S.P. Arefyev.</i> Phenotypic Structure of Spruce Populations in the European North of Russia.....	9
<i>S.S. Makarov, I.B. Kuznetsova, A.I. Chudetsky, S.A. Rodin.</i> Obtaining High-Quality Planting Material of Forest Berry Plants by Clonal Micropropagation for Restoration of Cutover Peatlands.....	21
<i>S.N. Tarkhanov, E.A. Pinaevskaya, Yu.E. Aganina.</i> Features of Adaptation of Different Forms of Scots Pine under Conditions of Prolonged Excessive Soil Moistening.....	30
<i>A.V. Dancheva, V.K. Pankratov.</i> Evaluation of Thinning Efficiency in Pineries of Dry Forest Sites of the Kazakh Uplands.....	45
<i>S.N. Goroshkevich.</i> Weather Conditionality of Siberian Stone Pine (<i>Pinus sibirica</i> Du Tour) Seeding.....	56
<i>V.G. Soukhovolsky, V.I. Voronin, V.A. Oskolkov, A.V. Kovalev.</i> Express Estimation of the Physiological State of Woody Plants by Dielectric Characteristics of Tree Stem Tissues.....	70
<i>I.N. Kutuyavin, A.V. Manov, A.F. Osipov, M.A. Kuznetsov.</i> Stand Structure of Northern Taiga Pine Forests.....	86
<i>V.M. Mamedaliyeva.</i> Algorithm and Measurement of Forest Cover Area Change in the Khachmaz Region of Azerbaijan by Satellite Monitoring.....	106

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>S.M. Bazarov, Iu.I. Belenkii, S.A. Ugryumov, F.V. Svoikin, V.F. Svoikin.</i> System Analysis of Process Efficiency of the Wheeled Forwarder.....	116
<i>S.Ye. Ariko, S.A. Voinash, D.A. Kononovich, V.A. Sokolova.</i> Power Characteristics of Mulcher Joints When Removing Tree and Shrub Vegetation.....	130

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>Yu.G. Skurydin, E.M. Skurydina, R.G. Safin, A.R. Khabibulina.</i> Physical and Mechanical Characteristics of a Pine Thermowood Composition during Barothermal Treatment.....	143
<i>G.A. Pilyushina, P.G. Pyrikov, E.A. Pamfilov, A.Ya. Danilyuk, V.V. Kapustin.</i> Improving the Performance of Wood-Metal Slide Bearings for Forestry Machinery.....	156

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- V.P. Sivakov, A.V. Vurasko, N.V. Kutsubina.* Experimental and Theoretical Study of Heat Losses in Drying Cylinders..... 169
- S.V. Aniskin, V.S. Kurov.* Dynamic Behavior of Liquid Flow Rate from Nozzles in Jet Scrubbers of Pulp Production..... 180
- N.A. Makarevich.* Non-Ideality Factor in Multifractal and Entropy-Based Analysis of Self-Organized Structures of Plant Polymers (Lignins)..... 194

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- R.V. Kotelnikov, A.A. Martynyuk.* An Indicator for Assessing the Effectiveness of Organizing Forest Fire Protection..... 213
-



УДК 630*165.1:630*165.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-9-20

ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИЙ ЕЛИ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРЕ РОССИИ

П.П. Попов, д-р биол. наук, гл. науч. сотр.; *ResearcherID:* [I-7762-2018](https://orcid.org/0000-0002-0987-7402),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0987-7402>

М.Н. Казанцева, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.; *ResearcherID:* [I-7753-2018](https://orcid.org/0000-0002-1227-6720),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1227-6720>

С.П. Арефьев, д-р биол. наук, гл. науч. сотр.; *ResearcherID:* [I-7761-2018](https://orcid.org/0000-0002-8621-9884),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8621-9884>

Институт проблем освоения Севера ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, ул. Малыгина, д. 86, а/я 2774,
г. Тюмень, Россия, 625003; e-mail: iposporov@mail.ru

Аннотация. На севере европейской части России сформировались популяции ели с признаками, популяционно-географическая изменчивость которых исследована недостаточно. Цель работы – изучение на основе биометрических показателей фенотипической структуры, географической дифференциации и относительного положения (к ели европейской и сибирской) популяций ели, располагающихся к северу от 60-й параллели. Ель здесь характеризуется значительным популяционно-географическим разнообразием: средняя длина шишек в популяциях находится в пределах 44...85 мм, коэффициент сужения верхней части семенных чешуй (C_n) – 36...68, коэффициент вытянутости (C_p) – 40...60, их разность ($C_n - C_p$) от –23 до +28 %. Коэффициенты географической вариации равны 15, 18, 12, 61 % соответственно. По величине показателя $C_n - C_p$ выделяются 6 групп популяций из 9 (I–IX), существующих на всей территории востока Европы и Сибири, исключая первые три группы. В группах IV, V, VI отмечается наибольшая частота (61, 72, 55 %) промежуточных фенотипов особей (*f.emm.*, *f.m.*, *f.mms.*), в группах VII, VIII, IX – наибольшая частота (71, 86, 98 %) фенотипов ели сибирской (*f.ms.*, *f.mss.*, *f.s.*). Существенно изменяется длина шишек по группам популяций: в первых она составляет в среднем 70...80 мм, во вторых – 50...60 мм. Группы популяций IV, V, VI представляют промежуточную форму елей европейской и сибирской и распространены к юго-западу от условной линии между реками Пинега и Мезень к Сыктывкару; группы VII, VIII, IX – ель сибирскую, занимая территорию к северо-востоку от указанной линии: Архангельскую область, территорию Республики Коми, Мурманской области и самую северную часть Карелии. Популяций, представляющих ель европейскую по изучаемым признакам, в регионе нет. Полученные результаты могут быть использованы при разработке дифференцированных приемов лесоводства на Европейском Севере России.

Для цитирования: Попов П.П., Казанцева М.Н., Арефьев С.П. Фенотипическая структура популяций ели на Европейском Севере России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 9–20. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-9-20

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания: проект № ААА-А-17-117050400146-5 НИР ТюмНЦ СО РАН.

Ключевые слова: ель, фенотип, структура популяции, изменчивость, Европейский Север, Россия.

Введение

Изучение биологических признаков и систематики ели на севере европейской части ее ареала издавна привлекало внимание исследователей [7, 8, 11, 16, 17, 23, 24, 35]. Биологические особенности этого вида здесь во многом обусловлены характером расселения в послеледниковое время [2, 10, 21] двух заметно различающихся елей: европейской *Picea abies* (L.) Karst. и сибирской *P. obovata* Ledeb. [21, 25, 30, 31]. Под влиянием естественно-исторических причин, почвенно-климатических факторов и природной гибридизации образовалось значительное индивидуальное (внутрипопуляционное) и межпопуляционное (географическое) разнообразие ели, сформировавшейся в этом регионе. Имеющиеся сведения о фенотипической структуре ели на Европейском Севере в значительной мере субъективны, поскольку получены по большей части на основе визуальной оценки главного диагностического признака елей европейской и сибирской – формы верхней части семенных чешуй [7, 8, 17, 21].

Характер взаимного расположения популяций разных групп в регионе изучен недостаточно, что создает определенные проблемы, прежде всего, для лесного хозяйства [14, 15]. Цель исследования – изучение фенотипической структуры, географической дифференциации, положения популяций ели Европейского Севера России относительно европейской и сибирской на основе данных об изменчивости основных систематических признаков, определяемых метрическим путем.

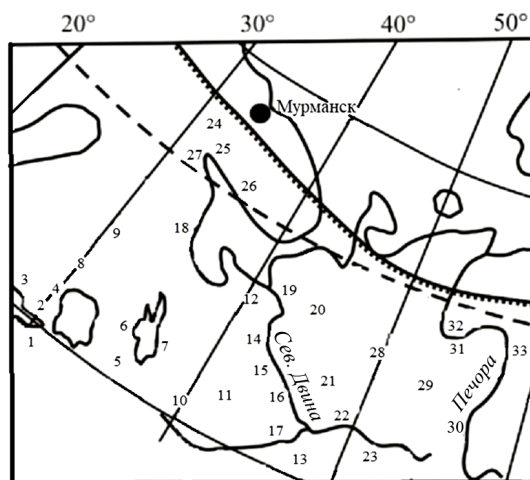
Объекты и методы исследования

Район исследования располагается к северу от 60-й параллели и от западной границы России до р. Печоры на востоке. Протяженность территории с юго-запада (Лисино, Рошино (Линдуловская роща), Выборг) до северо-востока (г. Печора) составляет почти 1 500 км. Исходный материал собирался в течение ряда лет (2012–2017 гг.) в оптимальных лесорастительных условиях (разнотравные и зеленомошные группы типов леса) соответствующего района с 5 327 деревьев в 33 располагающихся относительно равномерно на всей территории пунктах: 1 – Лисино; 2 – Рошино; 3 – Выборг; 4 – Сортавала; 5 – Ладва; 6 – Петрозаводск; 7 – Пудож; 8 – Реболы; 9 – Костомукша; 10 – Коноша; 11 – Ровдино; 12 – Обозерский; 13 – Великий Устюг; 14 – Березник; 15 – Рочегда; 16 – Верхняя Тойма; 17 – Ядриха; 18 – Кемь; 19 – Усть-Пинега; 20 – Карпогоры; 21 – Горка; 22 – Микунь; 23 – Сыктывкар; 24 – Мончегорск; 25 – Апатиты; 26 – Умба; 27 – Средний; 28 – Кослан; 29 – Ухта; 30 – Троицко-Печорск; 31 – Ижма; 32 – Усть-Цильма; 33 – Печора (рис. 1).

Под каждым деревом брали 1 шишку средней длины, неповрежденную и пригодную для обработки. Площадь пробы определяли количеством деревьев (шишек) ели – не менее 100 шт. по методике, опубликованной ранее [9, 20]. Фенотипическую структуру популяций и их географическую дифференциацию изучали по двум признакам – частоте фенотипов особей, выделяемых по метрическим параметрам верхней части семенных чешуй, и длине шишек, – которые являются основными при ботанической характеристике елей европейской и сибирской и их внутривидовых форм [32–34].

Рис. 1. Расположение пунктов сбора материалов для изучения изменчивости ели на севере европейской части России

Fig. 1. Location of collection points for the study of spruce variability in the north of European Russia



Форму семенных чешуй ели характеризовали по строению их верхней части с использованием коэффициентов сужения (*coefficient of narrowing* – C_n) и вытянутости (*coefficient of projection* – C_p) [18]. Разность этих коэффициентов ($C_n - C_p$) – более информативный показатель индивидуальных особенностей ели, на основе которого выделяются фенотипы особей, популяций и их группы. Структуру популяций изучали по частоте фенотипов (*f – fenotip*) особей, различающихся в среднем на 10 % показателя разности коэффициентов $C_n - C_p$ и соответствующих 9 группам (I–IX) популяций на востоке Европы и в Сибири [18, 28]:

$C_n - C_p, \%$	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30
Фенотип особи	<i>f.e</i>	<i>f.eem</i>	<i>f.em</i>	<i>f.emm</i>	<i>f.m</i>	<i>f.mms</i>	<i>f.ms</i>	<i>f.mss</i>	<i>f.s</i>
Условный индекс фенотипа	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Наименование их обусловлено степенью влияния генотипа ели европейской (*e – europaea*), сибирской (*s – sibirica*) и промежуточной формы (*m – medioxima*) [18, 21].

Первые три группы фенотипов характерны для ели европейской (*evr: f.e; f.eem; f.em*), три следующие представляют собой промежуточные варианты елей европейской и сибирской (*med: f.emm; f.m; f.mms*), последние три характеризуют ель сибирскую (*sib: f.ms; f.mss; f.s*). Такая дифференциация фенотипов отражает процессы интрогрессивной гибридизации европейской и сибирской елей и распространения разных групп (фенотипов) популяций [12, 21, 26]. Положение популяций ели в регионе оценивали относительно «эталонных» популяций ели европейской из Украинского Закарпатья и сибирской из Восточной Сибири [27] по величине квадрата дистанции Махаланобиса (Squared Mahalanobis Distances – SMD) на основе средних показателей C_n и C_p [1, 3, 4].

Результаты исследования и их обсуждение

В пределах региона наблюдается значительная изменчивость изученных показателей: средняя длина шишек составляет 44...85 мм (см. таблицу), коэффициент географической (межпопуляционной) вариации – 15 %.

Средние показатели длины шишек, формы семенных чешуи, структуры и относительного положения популяций ели на севере европейской части России

Пункты	n	L _c	C _n -C _p	Частота фенотипов, %										Σ			SMD	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	1-3	4-6	7-9	евр-med	sib-med	
<i>Группа популяций IV (C_n-C_p = -15...-24%)</i>																		
Лисино	76	81	-23	9	9	20	38	13	7	4	-	-	-	38	58	4	14,55	43,32
Рошино	120	80	-23	4	14	22	38	19	3	-	-	-	40	60	-	14,53	43,75	
Выборг	208	85	-22	8	11	27	23	20	8	3	-	-	46	51	3	11,25	33,40	
Сортавала	164	81	-17	4	4	23	27	23	13	5	1	-	31	63	6	16,72	28,04	
Ладва	175	80	-18	1	10	21	26	29	7	4	2	-	32	62	6	16,62	29,64	
Петрозаводск	100	77	-20	6	12	24	24	20	5	8	1	-	42	49	9	14,26	31,81	
Пудож	123	77	-18	4	6	21	17	37	13	2	-	-	31	67	2	17,73	35,44	
Среднее	-	80	-20	5	9	23	28	23	8	4	-	-	37	59	4	15,09	35,06	
<i>Группа популяций V (C_n-C_p = -6...-14%)</i>																		
Реболы	252	78	-13	-	6	13	30	27	14	9	1	-	19	71	10	19,50	19,16	
Костомукша	167	73	-10	-	6	10	17	32	20	10	10	5	16	69	25	23,13	13,44	
Коноша	130	80	-10	-	3	13	22	26	23	11	2	-	16	71	13	25,09	20,97	
Ровдино	235	81	-8	-	2	5	23	27	26	13	3	1	7	76	17	26,08	17,58	
Обозерский	220	64	-6	-	1	8	20	28	26	12	4	1	9	74	17	13,98	13,98	
Великий Устюг	100	79	-8	-	2	11	20	16	33	13	5	-	13	69	18	28,13	20,14	
Среднее	-	76	-9	-	3	10	22	26	23	11	4	1	13	71	16	22,65	17,55	
<i>Группа популяций VI (C_n-C_p = -5...+5%)</i>																		
Березник	135	79	-5	-	1	7	13	35	16	21	5	2	8	64	28	30,42	14,70	
Рочегда	220	76	-5	-	2	5	11	26	18	19	15	4	7	55	38	28,78	8,58	
Верхняя Тойма	350	82	-4	-	1	8	17	23	23	16	9	3	9	63	28	25,60	10,90	
Ядриха	107	77	-3	-	1	9	13	19	29	21	7	1	10	61	29	32,32	14,42	

Кемь	160	67	-2	-	1	8	16	19	24	17	12	3	9	59	32	27,91	9,97	
Усть-Пинега	200	68	1	-	1	2	8	24	19	29	10	7	3	51	46	34,15	7,58	
Карпогоры	250	63	2	-	1	2	11	17	20	25	16	8	3	48	49	31,78	6,46	
Горка	200	73	1	-	1	2	11	14	31	25	13	3	3	56	41	34,53	8,58	
Микунь	100	63	3	-	1	3	7	18	20	30	14	7	4	45	51	40,46	7,71	
Сыктывкар	210	73	4	-	-	5	9	15	22	22	20	7	5	46	49	33,53	6,51	
<i>Среднее</i>	-	72	-1	-	1	5	12	21	22	23	12	4	6	55	39	31,95	9,54	
<i>Группа популяций VII ($C_n - C_p = 6...14\%$)</i>																		
Мончегорск	117	57	8	-	-	-	6	9	22	29	26	8	-	37	63	52,41	4,52	
Апатиты	124	44	12	-	-	2	5	9	12	23	34	15	2	26	72	47,53	4,37	
Умба	72	59	15	-	-	-	-	-	1	14	36	35	14	-	15	85	73,22	3,10
Средний	220	69	10	-	-	1	3	7	18	33	25	13	1	28	71	45,43	3,67	
Кослан	100	69	8	-	-	1	4	7	22	36	19	11	1	33	66	56,10	2,94	
<i>Среднее</i>	-	60	11	-	-	1	3	7	18	31	28	12	1	28	71	54,94	3,72	
<i>Группа популяций VIII ($C_n - C_p = 15...24\%$)</i>																		
Ухта	100	65	19	-	-	-	1	8	8	13	32	38	-	17	83	68,86	0,86	
Троицко-Печорск	80	65	19	-	-	-	5	4	9	11	35	36	-	18	82	69,67	1,21	
Ижма	200	58	22	-	-	-	-	1	6	14	39	40	-	7	93	86,74	0,20	
<i>Среднее</i>	-	62	20	-	-	-	2	4	8	13	35	38	-	14	86	75,09	0,76	
<i>Группа популяций IX ($C_n - C_p = 25...34\%$)</i>																		
Усть-Цильма	190	50	28	-	-	-	-	1	2	3	24	70	-	3	97	103,5	0,08	
Печора	122	54	27	-	-	-	-	-	1	9	29	61	-	1	99	110,3	0,02	
<i>Среднее</i>	-	52	28	-	-	-	-	-	2	6	26	66	-	2	98	106,9	0,06	

Примечание. № и название пункта соответствуют рис. 1. n – число особей; L_c – длина шишек, мм; \sum – сумма частот фенотипов по группам; SMD – квадрат дистанции Махаланобиса.

Средние показатели формы семенных чешуй имеют следующие значения: $C_n - 36-68$; $C_p - 40-60$; $C_n - C_p$ – от -23 до $+28$ %. Коэффициент вариации – 18, 12, 61 % соответственно. Средние показатели C_n (49 %) и C_p (50 %) почти равны, но крайние варианты их разности ($-23...+28$ %) сильно отличаются (рис. 2), поэтому и коэффициент вариации очень большой. Велика изменчивость и показателя отклонения SMD анализируемых популяций от «эталонных» популяций елей европейской (14,26...110,30) и сибирской (43,75...0,02).

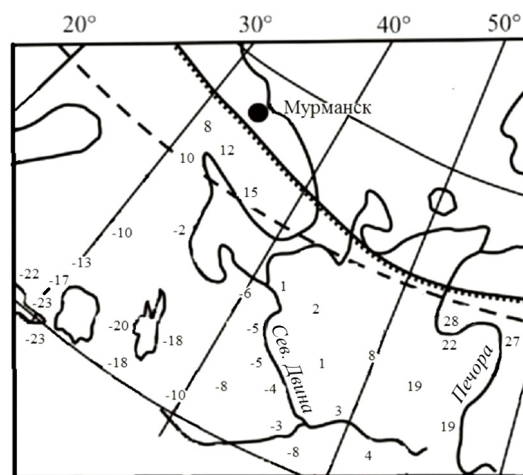


Рис. 2. Географическая изменчивость средних показателей разности коэффициентов сужения и вытянутости семенных чешуй ($C_n - C_p$) ели на севере европейской части России

Fig. 2. Geographical variability of the mean values of the difference of seed scale contraction and elongation coefficients ($C_n - C_p$) of spruce in the north of European Russia

Значение показателя $C_n - C_p$ в регионе находится в пределах от -23 до $+28$ %, что соответствует принятой градации групп популяций в районах: IV ($C_n - C_p = -15...-24$ %); V ($C_n - C_p = -6...-14$ %); VI ($C_n - C_p = -5...5$ %); VII ($C_n - C_p = 6...14$ %); VIII ($C_n - C_p = 15...24$ %); IX ($C_n - C_p = 25...34$ %) – и групп фенотипов особей (*med* и *sib*), поэтому принимаем эту градацию для анализа популяций.

По средней длине шишек ели вся совокупность популяций заметно разделяется на две большие группы: IV, V, VI (их длина около 70...80 мм) и VII, VIII, IX (50...60 мм). Значительными оказываются различия групп популяций по частоте фенотипов особей (рис. 3) и по величине SMD. Группы VIII и IX по показателю SMD близки к ели из Восточной Сибири [27].

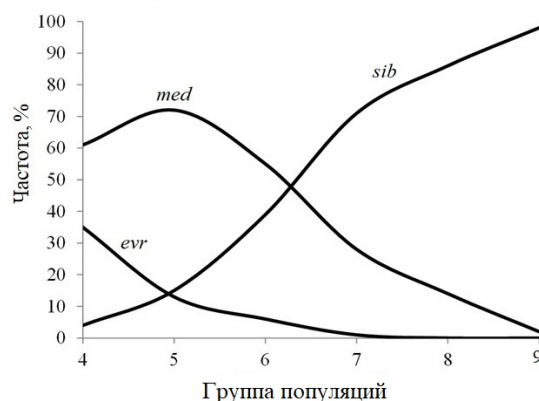


Рис. 3. Изменчивость частоты особей фенотипов ели европейской (*evr*), сибирской (*sib*) и промежуточной формы (*med*) на севере европейской части России

Fig. 3. Variability in the frequency of individuals of Norway spruce (*evr*), Siberian spruce (*sib*), and intermediate form (*med*) phenotypes in the north of European Russia

В группах IV, V, VI отмечается значительное преобладание особей промежуточных фенотипов (в среднем 59, 72, 55 % соответственно), при этом доля фенотипов ели европейской по группам (от IV к VI) уменьшается, а ели сибирской почти зеркально увеличивается. В группах популяций VII, VIII, IX – значительное преобладание особей фенотипов ели сибирской (71, 86, 98 %) при резком снижении частоты особей промежуточных фенотипов. Деревьев фенотипов ели европейской здесь практически нет. Однако при визуальной оценке формы семенных чешуй в южной части Карелии и в западных районах Архангельской области некоторые авторы выделяли до 50 % и более форм, относящихся к ели европейской [7, 17]. По преобладанию соответствующих фенотипов группы IV, V, VI представляют промежуточную форму елей европейской и сибирской, а группы VII, VIII, IX – ель сибирскую [19]. По величине SMD группа IV несколько ближе к «эталонной» популяции ели европейской, чем сибирской, все остальные группы ближе к последней.

В соответствии со структурой популяций изменяется показатель их разнообразия по частоте фенотипов при их 9-классной градации [28]:

Группы популяций	Показатель разнообразия
IV	6,14 (5,15–6,89)
V	6,20 (5,99–6,38)
VI	6,71 (6,44–7,04)
VII	5,45 (4,16–6,06)
VIII	4,61 (3,90–5,05)
IX	3,00 (2,96–3,03)

В группах IV, V, VI этот показатель заметно выше и характеризуется высоким уровнем разнообразия, а в группах VIII и IX ниже и соответствует низкому и среднему уровню [28], группа VII занимает промежуточное положение, ее показатель близок к среднему для всей совокупности популяций.

Существенными различия популяций ели оказываются не только по форме семенных чешуй, но и по другим признакам [6, 13, 22]. Например, по данным Г.Г. Гончаренко, В.Е. Падутова [5], на территории Карелии и западных районов Архангельской области частота аллеля $Gri^{0,80}$ (28...40 %) оказывается значительно больше, чем на территории Беларуси и Прибалтики (популяции ели европейской), но значительно меньше, чем в популяциях ели сибирской (Красноярск, Алтай). Частота аллеля $Gdh^{0,75}$ в первых оказывается наибольшей (35...46 %), что указывает на некоторую обособленность ели в этом районе и ее существенные отличия от деревьев, произрастающих в других географических областях.

В анализируемой совокупности популяционных выборок между средней величиной показателя $C_n - C_p$ и длиной шишек обнаруживается большое сходство в географической изменчивости, характеризующееся высоким уровнем корреляции: корреляционное отношение – $0,851 \pm 0,0943$, коэффициент отрицательной корреляции – $-0,827 \pm 0,101$. Рассчитанная по уравнению $L_c = -0,587(C_n - C_p) + 70$ длина шишек в зависимости от средней величины $C_n - C_p$ оказывается достаточно близкой к эмпирической (фактической):

$C_n - C_p, \%$	-23	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	28
Длина шишек, мм	84	82	79	76	73	70	67	64	61	58	55	54

Отсюда видно, что с изменением показателя $C_n - C_p$ на 5 % средняя длина шишек изменяется на 3 мм, что имеет определенное лесоводческое значение, поскольку с ней связано количество и качество семян, влияющие на рост молодых растений. Изучение популяционно-географической ели в том или ином регионе по признаку высокой генетической детерминации (форме семенных чешуй) имеет научное и практическое значение [13, 21, 32].

Популяционно-географическая изменчивость ели на Европейском Севере России обусловлена не только предшествующими процессами интрогрессии елей, но и изменением основных климатических факторов, с которыми напрямую связаны средние показатели длины шишек и семенных чешуй [21, 28, 29]. Температура января от Карельского перешейка до восточного берега Онежского озера и Белого моря составляет $-8...-12$ °С, к востоку, до верхней половины Мезени, $-12...-16$ °С, еще дальше к востоку $-16...-20$ °С. Изотерма июля, равная $+16$ °С, проходит (примерно) от пос. Реболы к пос. Карпогоры и далее к г. Сыктывкару. К северо-востоку от нее температура понижается до $+12$ °С, к юго-западу повышается до $+20$ °С. Почвы на всей территории региона подзолистые (в разной степени). Приведенные данные отчасти совпадают с результатами исследований ряда авторов [7, 8, 17, 21], но имеются и существенные несовпадения, что обусловлено использованием разных методических приемов.

Заключение

Ель на севере европейской части России характеризуется большим разнообразием частоты фенотипов особей, длины шишек и формы семенных чешуй (описывали, используя величину разности коэффициентов сужения и вытянутости). Четко выделяются 6 групп популяций (IV, V, VI, VII, VIII, IX) из 9 (I–IX), характерных для всей территории востока Европы и Сибири. В группах IV, V, VI отмечается наибольшая частота особей промежуточных фенотипов, они представляют промежуточную форму елей европейской и сибирской и располагаются в юго-западной части региона, включая районы Северной Двины, Пинеги. В распространенных к северо-востоку от условной линии «р. Пинега – р. Мезень – г. Сыктывкар» в Архангельской области, на территории Республики Коми, Мурманской области и самой северной части Республики Карелия группах VII–IX – значительное преобладание фенотипов ели сибирской. Популяций, соответствующих ели европейской по изучаемым признакам, здесь нет.

Показатели, определяющие форму семенных чешуй, имеют большое сходство в географической изменчивости и с другими биологическими признаками ели, что может быть использовано для обоснования выделяемых внутривидовых форм и лесоводственной практики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боровиков В.П. Популярное введение в программу STATISTICA. М.: КомпьютерПресс, 1998. 267 с. [Borovikov V.P. *Popular Introduction to STATISTICA*. Moscow, Komp'yuterPress Publ., 1998. 267 p.].

2. Волкова П.А. Использование молекулярно-генетических данных для анализа миграционных путей сосудистых растений в Восточной Европе в позднеледниковье:

автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2015. 42 с. [Volkova P.A. *Using Molecular Genetic Data to Analyze Migration Routes of Vascular Plants in Eastern Europe in the Late Glacial Period*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2015. 42 p.].

3. *Гашев С.Н.* Программа для ЭВМ «STATAN–2011». Свидетельство о регистрации RUS 2011615336 от 26.04.2011. [Gashev S.N. *Computer Program “STATAN–2011”*. Certificate of Registration RF, no. 2011615336, 2011].

4. *Гашева Н.А.* Опыт применения кластерного и дискриминантного анализа при описании структуры популяций ели по форме семенных чешуй // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2001. № 2. С. 113–116. [Gasheva N.A. Experience with Cluster and Discriminant Analysis When Describing the Structure of Spruce Populations by the Form of Seed Scales. *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2001, no. 2, pp. 113–116].

5. *Гончаренко Г.Г., Падутов В.Е.* Популяционная и эволюционная генетика елей Палеарктики. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2001. 197 с. [Goncharenko G.G., Padutov V.E. *Population and Evolutionary Genetics of Spruces of the Palearctic*. Gomel, NASB Institut of Forest Publ., 2001. 197 p.].

6. *Захарова К.В., Сейц К.С.* Внутрипопуляционная фенотипическая дифференциация гибридных популяций *Picea abies* × *Picea obovata* (Pinaceae) в контрастных экологических условиях // Ботан. журн. 2011. Т. 96, № 6. С. 709–738. [Zakharova K.V., Seits K.S. The Intrapopulation Phenotypic Diversity of the *Picea abies* × *Picea obovata* (Pinaceae) Hybrid Populations in Contrast Environmental Conditions. *Botanicheskii Zhurnal*, 2011, vol. 96, no. 6, pp. 709–738].

7. *Ильинов А.А., Харин В.Н., Тренин В.В.* Популяционная структура ели финской *Picea×fennica* (Regel) в Карелии // Научные основы селекции древесных растений Севера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 12–24. [Il'inov A.A., Kharin V.N., Trenin V.V. Population Structure of Finnish Spruce *Picea×fennica* (Regel) in Karelia. *Scientific Foundations of Tree Breeding in the North*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 1998, pp. 12–24].

8. *Ильинов А.А., Политов Д.В., Исаева Л.Г., Данилова Е.В.* Фенотипическая и генетическая структура популяций ели финской в условиях промышленного загрязнения в Мурманской области // Современные экологические проблемы Севера (к 100-летию со дня рождения О.И. Семенова Тянь-Шанского): материалы междунар. конф., 10–12 октября 2006 г. Ч. 1. / Институт проблем промышленной экологии Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. С. 73–75. [Il'inov A.A., Politov D.V., Isayeva L.G., Danilova E.V. Phenotypic and Genetic Structure of Finnish Spruce Populations in Industrially Polluted Areas of the Murmansk Region. *Modern Ecological Problems of the North (to the Centenary of the O.I. Semenov-Tyan-Shanskiy Birthday): Proceedings of the International Conference, October 10–12, 2006, Part 1*. Apatity, KSC RAS Publ., 2006, pp. 73–75].

9. *Казанцева М.Н., Арефьев С.П., Попов П.П.* Индивидуальная и географическая изменчивость шишек и формы семенных чешуй ели сибирской в сибирской части ареала // Лесоведение. 2019. № 3. С. 198–207. [Kazantseva M.N., Aref'ev S.P., Popov P.P. Individual and Geographic Variability of Cones and Seed Scale Forms of Siberian Spruce in the Siberian Part of the Range. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no 3, pp. 198–207]. DOI: [10.1134/S0024114819020037](https://doi.org/10.1134/S0024114819020037)

10. *Кожаринов А.В., Борисов П.В., Горшкова И.И.* Палеоареал ели европейской (*Picea abies* (Karst.) L.) на территории Восточной Европы за последние 13500 лет // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2010. № 1. С. 71–82. [Kozharinov A.V., Borisov P.V., Gorshkova I.I. Paleohabit of Norway Spruce (*Picea abies* (Karst.) L.) in the Territory of Eastern Europe within the Latest 13.500 years. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2010, no. 1, pp. 71–82].

11. *Комарова А.М.* Качество семян ели в зоне интрогрессивной гибридизации: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2011. 19 с. [Komarova A.M. *The Qual-*

ity of Spruce Seeds in the Zone of Introgressive Hybridization: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2011. 19 p.].

12. Коропачинский И.Ю., Милютин Л.И. Естественная гибридизация древесных растений. Новосибирск: Гео, 2006. 223 с. [Koropachinskiy I.Yu., Milyutin L.I. *Natural Hybridization in Woody Plants*. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 223 p.].

13. Коропачинский И.Ю., Потемкин О.Н., Рудиковский А.В., Кузнецова Е.В. Полиморфизм и структура популяций ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на северном пределе распространения вида // Сиб. экол. журн. 2012. № 2. С. 175–184. [Koropachinskii I.Y., Potemkin O.N., Rudikovskii A.V., Kuznetsova E.V. Polymorphism and Structure of Populations of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) at the Northern Limits of the Species Distribution. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2012, no. 2, pp. 175–184].

14. Мамаев С.А., Махнев А.К. Проблемы биологического разнообразия и его поддержания в лесных экосистемах // Лесоведение. 1996. № 5. С. 3–10. [Mamayev S.A., Makhnev A.K. Problems of Biological Diversity and Its Maintenance in Forest Ecosystems. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1996, no. 5, pp. 3–10].

15. Мамаев С.А., Семериков Л.Ф., Махнев А.К. О популяционном подходе в лесоводстве // Лесоведение. 1988. № 1. С. 3–9. [Mamayev S.A., Semerikov L.F., Makhnev A.K. On the Population Approach in Forest Science. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1988, no. 1, pp. 3–9].

16. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Юдина О.А. Морфологическая изменчивость ели в географических культурах Архангельской области // Лесоведение. 2009. № 2. С. 28–34. [Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Yudina O.A. Morphological Variability of Spruce in Provenance Trials of Arkhangelsk Region. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2009, no. 2, pp. 28–34].

17. Орлова Л.В., Егоров А.А. К систематике и географическому распространению ели финской (*Picea fennica* (Regel) Kom., *Pinaceae*) // Новости систематики высших растений. 2010. Т. 42. С. 5–23. [Orlova L.V., Egorov A.A. To the Systematics and Geographical Distribution of Finnish Spruce (*Picea fennica* (Regel) Kom., *Pinaceae*). *Novosti sistematiki vysshikh rastenii* [Novitates Systematicae Plantarum Vascularium], 2010, vol. 42, pp. 5–23].

18. Попов П.П. Фенотипическая структура популяций *Picea abies* и *P. obovata* (*Pinaceae*) на востоке Европы // Ботан. журн. 2013. Т. 98, № 11. С. 1384–1402. [Popov P.P. Phenotypic Structure of *Picea abies* and *P. obovata* Populations (*Pinaceae*) in the Eastern Europe. *Botanicheskii Zhurnal*, 2013, vol. 98, no. 11, pp. 1384–1402].

19. Попов П.П. Распространение популяции промежуточной формы елей европейской и сибирской в российской части ареала // Лесхоз. информ. 2020. № 1. С. 69–75. [Popov P.P. Distribution of Intermediate Populations of the European and Siberian Spruces in the Russian Part of the Area. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 1, pp. 69–75]. DOI: [10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.07](https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.07)

20. Попов П.П., Арефьев С.П., Казанцева М.Н. Фенотипическая структура популяций ели некоторых особо охраняемых природных территорий на востоке Европы и в Сибири // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. Т. 4, № 4. С. 26–33. [Popov P.P., Arefyev S.P., Kazantseva M.N. Phenotypic Diversity of Spruce Populations in Some Protected Areal in Eastern Europe and Siberia. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka* [Nature Conservation Research], 2019, vol. 4, no. 4, pp. 26–33. DOI: [10.24189/ncr.2019.060](https://doi.org/10.24189/ncr.2019.060)

21. Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 178 с. [Pravdin L.F. *Norway Spruce and Siberian Spruce in the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 178 p.].

22. Рыжова Н.В., Шутлов В.В., Корнев И.А., Малышев В.А., Лебедев О.Ю. Морфология шишек и продуктивность ели в Костромской области // Лесоведение. 2003.

№ 5. С. 61–64. [Ryzhova N.V., Shutov V.V., Korenev I.A., Malyshev V.A., Lebedev O.Yu. Morphology of Cones and Productivity of Spruce in Kostroma Oblast. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2003, no. 5, pp. 61–64].

23. Тарханов С.Н. Популяционная изменчивость ели финской по форме семенных чешуй на севере Архангельской области // Лесоведение. 2019. № 3. С. 208–214. [Tarkhanov S.N. Population Variability of Finnish Spruce from the Seed Scale Forms in Northern Arkhangelsk Oblast. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 3, pp. 208–214]. DOI: [10.1134/S0024114819020116](https://doi.org/10.1134/S0024114819020116)

24. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А. Изменчивость морфоструктурных признаков ели разного возраста в условиях севера Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 56–66. [Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A. Variability of Morphostructural Features of Uneven-Aged Spruce in the North of Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 56–66]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.2.56](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.56), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ff3/56_66.pdf

25. *Biology and Ecology of Norway Spruce*. Ed. by M.G. Tjoelker, A. Boratynski, W. Bugala. Netherlands, Springer, 2007. 474 p. DOI: [10.1007/978-1-4020-4841-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4841-8)

26. Krutovskii K.V., Bergmann F. Introgressive Hybridization and Phylogenetic Relationships between Norway, *Picea abies* (L.) Karst., and Siberian, *P. obovata* Ledeb., Spruce Species Studied by Isozyme Loci. *Heredity*, 1995, vol. 74, iss. 5, pp. 464–480. DOI: [10.1038/hdy.1995.67](https://doi.org/10.1038/hdy.1995.67)

27. Popov P.P. Reference Populations for Discriminant Analysis in the Continuous Range of Norway and Siberian Spruces. *Russian Journal of Ecology*, 2012, vol. 43, iss. 1, pp. 13–18. DOI: [10.1134/S1067413612010092](https://doi.org/10.1134/S1067413612010092)

28. Popov P.P. Population Structure in European and Siberian Spruces According to Their Phenotypes. *Russian Journal of Ecology*, 2017, vol. 48, iss. 5, pp. 403–408. DOI: [10.1134/S1067413617050101](https://doi.org/10.1134/S1067413617050101)

29. Ravazzi C. Late Quaternary History of Spruce in Southern Europe. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2002, vol. 120, iss. 1-2, pp. 131–177. DOI: [10.1016/S0034-6667\(01\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(01)00149-X)

30. Schmidt P.A. *Picea abies* (L.) H. Karst. *Enzyklopädie der Holzgewächse*. Erg. I. fig. 2002, vol. 28, no. 7, pp. 1–18.

31. Schmidt P.A. *Picea obovata* Ledeb. *Enzyklopädie der Holzgewächse*. Erg. I. fig. 2002, vol. 30, no. 12, pp. 1–13.

32. Schmidt-Vogt H. Studien zur morphologischen Variabilität der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.). 3. Der gegenwärtige Stand der Forschung zur morphologischen Variabilität der Fichte – gesetzmässigkeiten und Theorien. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 1972, vol. 143, no. 11, pp. 221–240.

33. Staszkiwicz J. Zmienność kształtu szyszek świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) Karst.) w Karpatach [Variability of Cones of *Picea abies* (Karst.) in Carpathian]. *Fragmenta floristica et Geobotanica*, 1976, vol. 22, no. 1-2, pp. 35–42.

34. Staszkiwicz J. The variability of the cones of *Picea abies* (L.) Karst. in Bosnia and Herzegovina. *Zbornik Radova Akademija nauka i umjetnosti. Bosne i Hercegovine*, 1983, vol. 72, no. 21, pp. 221–229.

35. Tollefsrud M.M., Kissling R., Gugeril F., Johnsen Ø., Skråppa T., Cheddadi R., van der Knaap W.O., Latalowa M., Terhürne-Berson R., Litt T., Geburek T., Brochmann C., Sperisen C. Genetic Consequences of Glacial Survival and Postglacial Colonization in Norway Spruce: Combined Analysis of Mitochondrial DNA and Fossil Pollen. *Molecular Ecology*, 2008, vol. 17, iss. 18, pp. 4134–4150. DOI: [10.1111/j.1365-294x.2008.03893.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2008.03893.x)

**PHENOTYPIC STRUCTURE OF SPRUCE POPULATIONS
IN THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA**

Petr P. Popov, Doctor of Biology, Chief Research Scientist; ResearcherID: [I-7762-2018](https://orcid.org/0000-0002-0987-7402),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0987-7402>

Mariya N. Kazantseva, Candidate of Biology, Leading Research Scientist; ResearcherID: [I-7753-2018](https://orcid.org/0000-0002-1227-6720),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1227-6720>

Stanislav P. Arefyev, Doctor of Biology, Chief Research Scientist; ResearcherID: [I-7761-2018](https://orcid.org/0000-0002-8621-9884),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8621-9884>

Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Centre SB RAS,
ul. Malygina, 86, a/ya 2774, Tyumen, 625003, Russian Federation; e-mail: ipospopov@mail.ru

Abstract. Spruce populations in the north of the European part of Russia have formed with traits, the population-geographic variability of which has not been sufficiently studied. The research purpose is to study on the basis of biometric parameters the phenotypic structure and geographic differentiation of spruce populations located north of the 60th parallel, as well as their relative position to European and Siberian spruces. Spruce is characterized here by a significant population-geographical diversity. The average length of cones in populations is within 44–85 mm, the coefficient of narrowing of the upper part of seed scales (C_n) is 36–68, elongation coefficient (C_p) is 40–60 %, and their difference ($C_n - C_p$) is from –23 to +28 %. The coefficients of geographical variation are 15, 18, 12, and 61 %, respectively. By the value of the $C_n - C_p$ index, 6 groups of populations out of 9 (I–IX) existing throughout the east of Europe and Siberia are distinguished, excluding the first three groups. There are intermediate phenotypes of individuals (*f.emm.*, *f.m.*, *f.mms.*) in groups IV, V and VI with the highest frequency (61, 72, 55 %), in groups VII, VIII and IX the highest frequency (71, 86, 98 %) is among Siberian spruce phenotypes (*f.ms.*, *f.mss.*, *f.s.*). The length of the cones varies significantly in the population groups: 70–80 mm on average in the first; 50–60 mm on average in the second. Population groups IV, V and VI represent an intermediate form of European and Siberian spruces and are distributed southwest of the conditional line between the rivers Pinega and Mezen to Syktyvkar. Groups VII, VIII and IX represent Siberian spruce and occupy the territory northeast of the specified line: the Arkhangelsk region, the territory of the Komi Republic, the Murmansk region and the northernmost part of Karelia. There are no populations representing European spruce in the region according to the studied characteristics. The results obtained can be used in the development of differentiated methods of forestry in the European North of Russia.

For citation: Popov P.P., Kazantseva M.N., Arefyev S.P. Phenotypic Structure of Spruce Populations in the European North of Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 9–20. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-9-20

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignment. Research work of the Tyumen Scientific Centre SB RAS, project No. AAAA-A17-117050400146-5.

Keywords: spruce, phenotype, structure of population, variability, European North, Russia.

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
The author declare that there is no conflict of interest*

Поступила 24.12.19 / Received on December 24, 2019

УДК 634.7

DOI: 10.17238/0536-1036-2021-2-21-29

OBTAINING HIGH-QUALITY PLANTING MATERIAL OF FOREST BERRY PLANTS BY CLONAL MICROPROPAGATION FOR RESTORATION OF CUTOVER PEATLANDS

Sergey S. Makarov¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAB-4651-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Irina B. Kuznetsova², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),

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

Anton I. Chudetsky¹, Leading Engineer; ResearcherID: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>

Sergey A. Rodin³, Doctor of Agriculture, Academician of RAS, Deputy Director for Research; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8947-9809>

¹Central-European Forest Experiment Station, ARRISMF, prosp. Mira, 134, Kostroma, 156013, Russian Federation; e-mail: makarov_serg44@mail.ru, a.chudetsky@mail.ru

²Kostroma State Agricultural Academy, ul. Uchebnyy gorodok, 34, pos. Karavayevo, Kostroma district, Kostroma region, 156530, Russian Federation; e-mail: sonnereiser@yandex.ru

³All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow region, 141202, Russian Federation

Abstract. The results of studies on the improvement of technology for producing high-quality planting material of half-high blueberry and Arctic bramble by the method of clonal micropropagation are presented in the current paper. Creation of forest berry plantations in peat extraction areas allows reducing environmental damage and significantly increasing the efficiency of the timber industry. In recent decades, there has been an increasing interest in the creation of forest berry plantations on drained and cutover peatlands in Russia and other countries. It is necessary to use varietal planting material for the successful cultivation of forest berry plants on an industrial scale. Clonal micropropagation is the most effective of the vegetative methods for obtaining planting material, which allows receiving a huge amount of healthy planting material all year round in the conditions of a small laboratory area. Chloride-free ecosterilizer and bleaching agent based on sodium hypochlorite “Belizna” with an exposure of 15 and 20 min showed high efficiency in sterilization of explants of half-high blueberry and Arctic bramble. The highest viability of explants of the studied forest berry crops was observed when sterilized with a 0.1 % mercuric chloride solution and 15 min exposure, and its sharp decrease at 20 min exposure. At the stage of micropropagation, with an increase in the concentration of cytokinin 6-BAP from 0.5 to 1.0 mg/L on the nutrient Woody Plant Medium the number of shoots in regenerated plants of half-high blueberry (Northcountry and Northblue cultivars) and Arctic bramble (Anna and Sofia cultivars) increased. The effect of the concentration of IBA-derived auxin on the number and length of roots of regenerated plants was observed at the *in vitro* rooting stage.

For citation: Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I., Rodin S.A. Obtaining High-Quality Planting Material of Forest Berry Plants by Clonal Micropropagation for Restoration of Cutover Peatlands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 21–29. DOI: 10.17238/0536-1036-2021-2-21-29

Keywords: Arctic bramble, clonal micropropagation, cultivar, cutover peatlands, growth regulator, half-high blueberry, *in vitro*.

Introduction

The negative environmental consequences of peat excavations include the violation of the unique ecological marsh systems, the deterioration of the living

conditions of marsh and forest flora and fauna, and the associated reduction in the number of its populations up to complete destruction, as well as a decrease in the reserves of ground, underground and surface waters. In addition, valuable berry and medicinal plants growing in swamps are destroyed significantly, and the likelihood of peat fires increases, as a result of which a huge amount of smoke and other peat combustion products that can be transported over distances of tens and hundreds of kilometers are released into the atmosphere.

The reclamation of cutover peatlands is one of the important issues of forestry. Creation of plantations of forest berry plants in peat extraction areas allow to reduce environmental damage and significantly increase the efficiency of the forest industry. In recent decades, in Russia, as in other countries of the world, there is a growing interest in the creation of plantations of forest berry plants on drained and cutover peatlands. For these purposes, it is best to use berry crops that have traditionally grown in forest biocenoses, such as blueberry, cranberry, lingonberry and Arctic bramble. This is becoming increasingly important due to the constantly increasing anthropogenic load, as a result of which the resources of wild forest berry crops are steadily decreasing, their productivity is decreasing, and their quality is deteriorating [6, 13, 19].

It is necessary to use varietal planting material for successful plantation cultivation of forest berry plants on an industrial scale. Selection of forest berry crops is carried out by both Russian and foreign scientists. So far, Russian varieties have already been created and hybrid forms of forest berry plants have been selected. These varieties and hybrid forms are promising for cultivation in southern taiga and coniferous-deciduous forest areas of the European part of the Russian Federation.

Such forest berry crops as blueberry and Arctic bramble can be successfully used for the recultivation of cutover peatlands. The fruits of these forest berry plants are dietary products with high nutritional value. They contain vitamins and biologically active substances necessary for the normal functioning of the human body. Moreover, these plants have medicinal properties. For example, blueberry fruits are rich in vitamin P substances that regulate the functioning of endocrine glands, have anti-inflammatory and antitumor effects, and are effective in prevention and treatment of atherosclerosis, hypertension, rheumatism and other diseases [1, 3, 9, 17, 18, 20]. Arctic bramble fruits are used in folk medicine as an antizingotic, antipyretic agent, as well as for kidney stone disease, gout, gastritis, colitis, anemia, acute respiratory diseases, and bronchial asthma. Fresh leaves are used for wound healing, and tincture of leaves is used for rheumatism [2, 4, 5, 7, 15].

Blueberry and Arctic bramble can be propagated both by seeds and by stem and root cuttings (vegetative), as well as by using *in vitro* tissue cultivation. It should be taken into account that that plants produced by seed propagation do not retain the features of the original mother variety, therefore this method is not suitable for varietal plants. Clonal micropropagation is the most effective of vegetative methods of obtaining planting material. This method allows receiving in conditions of small laboratory area a huge amount of healthy (virus-free) planting material all year round [10, 11].

Materials and methods

Our studies are devoted to improving the technology for producing high-quality planting material of high-half blueberry and Arctic bramble using the clonal micropropagation. The research was carried out in the Laboratory of Clonal Micropropagation of Plants on the basis of the Central European Forest Experimental

Station of the All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry in 2018–2019. As research objects We used two cultivars of high-half blueberry (Northblue and Northcountry), obtained by crossing *V. corymbosum* and *V. angustifolium* [8, 12, 14], and two cultivars of Arctic bramble (*Rubus arcticus* L., Anna and Sofia) [16].

At the stage of introduction to *in vitro* culture, we studied the effect of various sterilizers with different exposures on the viability of explants of high-half blueberry and Arctic bramble. We used mercuric chloride (0.1 % solution), chloride-free ecosterilizer and bleaching agent based on sodium hypochlorite “Belizna” as the main sterilizers, with exposures of 10, 15 and 20 min. After 14 days, the viability of explants was determined by the ratio of live explants to the total number introduced into the culture. In each variant, 100 explants were introduced. Also we carried out a series of experiments to study the effect of cytokinin 6-BAP at the concentrations of 0.5 and 1.0 mg/L on the biometric parameters of shoots and IBA-derived auxin at the concentrations of 0.5 and 1.0 mg/L on *in vitro* rhizogenesis. Plants were cultivated on the Woody Plant Medium (WPM) with pH in the range of 4.5–4.8. The number and length of shoots and roots were recorded. 10-fold repeat.

Results and discussion

At the stage of *in vitro* culture introduction, we found that the ecosterilizer and bleaching agent were the most effective at an exposure of 15 and 20 min, where the explant viability was 75–91 %. The explants viability of both berry crops is quite high (80–90 %) when treated with corrosive sublimate for 15 min, but it sharply decreased to 25–28 % with an increase in exposure to 20 min. This is apparently due to the phytotoxicity of mercuric chloride. The percentage of viable explants when treated with the studied sterilizing agents (except chloride-free ecosterilizer) was very low (20–24 %) at an exposure time of 10 min (table 1). The rest explants died from infection.

Table 1

The explants viability of high-half blueberry and Arctic bramble depending on sterilizing agents and exposure

Sterilization time, min	Explants viability, %					
	High-half blueberry			Arctic bramble		
	Mercuric chloride	Chloride-free ecosterilizer	Bleaching agent	Mercuric chloride	Chloride-free ecosterilizer	Bleaching agent
10	20	50	15	24	56	22
15	90	90	75	80	91	80
20	25	95	95	28	93	91

At the stage of micropropagation itself, increasing the concentration of cytokinin 6-BAP from 0.5 to 1.0 mg/L on the WPM medium increased the number of shoots in regenerated plants of high-half blueberry cultivars Northcountry and Northblue and Arctic bramble cultivars Anna and Sofia. At the concentration of 6-BAP 0.5 mg/L the number of shoots of high-half blueberry and Arctic bramble was

2.1–2.4 and 2.5–2.6 pcs, respectively. At the concentration of 1.0 mg/L it was 3.2–3.5 and 4.6–4.7 pcs, respectively. No significant differences were found in the studied cultures depending on the variety (table 2).

Table 2

The number of shoots of high-half blueberry and Arctic bramble depending on the cultivar and 6-BAP concentration, pcs

Species	Cultivar	6-BAP concentration, mg/L		LSD ₀₅
		0.5	1.0	
High-half blueberry	Northblue	2.1	3.5	1.41
	Northcountry	2.4	3.2	1.93
Arctic bramble	Anna	2.6	4.6	0.13
	Sofia	2.5	4.7	0.22

LSD₀₅ – least significant difference at 5 % significance level.

The average shoot length of high-half blueberry cultivars Northblue and Northcountry with an increase in cytokinin 6-BAP in the nutrient medium slightly decreased from 3.9–4.1 cm at 0.5 mg/L to 3.0–3.3 cm at 1.0 mg/L. A similar pattern was observed for Arctic bramble: the average length was 1.5–1.7 cm at the concentration of 6-BAP 0.5 mg/L, and 1.1–1.2 cm at 1.0 mg/L (table 3).

Table 3

The average shoot length of high-half blueberry and Arctic bramble depending on the cultivar and 6-BAP concentration, cm

Species	Cultivar	6-BAP concentration, mg/L		LSD ₀₅
		0.5	1.0	
High-half blueberry	Northblue	4.1	3.0	0.29
	Northcountry	3.9	3.3	0.47
Arctic bramble	Anna	1.5	1.2	0.05
	Sofia	1.7	1.1	0.08

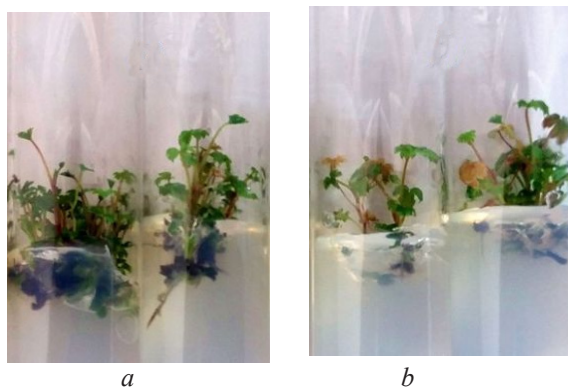
The total shoot length in both studied berry crops was greater at the concentration of 6-BAP 1.0 mg/L and reached 10.5–10.6 cm for half-high blueberry and 5.2–5.5 cm for Arctic bramble. It was 8.6–9.4 cm and 3.9–4.2 cm, respectively, at the concentration of 6-BAP 0.5 mg/L (fig.).

There were no significant differences in both berry crops depending on the cultivar (table 4).

Table 4

The total shoot length of high-half blueberry and Arctic bramble depending on the cultivar and 6-BAP concentration, cm

Species	Cultivar	6-BAP concentration, mg/L		LSD ₀₅
		0.5	1.0	
High-half blueberry	Northblue	8.6	10.5	0.60
	Northcountry	9.4	10.6	0.34
Arctic bramble	Anna	3.9	5.5	0.19
	Sofia	4.2	5.2	0.33



Arctic bramble plants *in vitro* at the stage of micropropagation itself with the addition of 6-BAP to the nutrient medium in the following concentrations, mg/L: *a* – 1.0; *b* – 0.5

At the *in vitro* rooting stage, we studied the effect of IBA-derived auxin concentrations on the number and length of roots of regenerated plants of high-half blueberry and Arctic bramble. The number of roots increased from 1.9–2.1 up to 3.9–4.1 pcs for half-high blueberry with an increase in the concentration of IBA-derived auxin in the nutrient medium from 0.5 to 1.0 mg/L, and from 3.7–3.8 to 4.5–4.6 pcs for Arctic bramble. Significant differences in the cultivars of the studied berry crops by the number of roots were not detected (table 5).

Table 5

The number of roots of high-half blueberry and Arctic bramble depending on the cultivar and IBA-derived auxin concentration, pcs.

Species	Cultivar	IBA-derived auxin concentration, mg/L		LSD ₀₅
		0.5	1.0	
High-half blueberry	Northblue	1.9	4.1	0.34
	Northcountry	2.1	3.9	0.41
Arctic bramble	Anna	3.8	4.5	0.69
	Sofia	3.7	4.6	0.51

The average root length decreased slightly with increasing concentration of IBA-derived auxin. It was 1.5–1.6 cm at 0.5 mg/L, and 1.3 cm at 1.0 mg/L for half-high blueberry, and 1.1–1.2 and 0.8–0.9 cm, respectively, for Arctic bramble. There were practically no differences in the average root length of both berry crops depending on the cultivar (table 6).

Table 6

The average root length of high-half blueberry and Arctic bramble depending on the cultivar and IBA-derived auxin concentration, cm

Species	Cultivar	IBA-derived auxin concentration, mg/L		LSD ₀₅
		0.5	1.0	
High-half blueberry	Northblue	1.6	1.3	0.45
	Northcountry	1.5	1.3	0.52
Arctic bramble	Anna	1.1	0.9	0.13
	Sofia	1.2	0.8	0.18

The total root length of half-high blueberry was increased from 3.0–3.1 cm to 5.1–5.3 cm with an increase in the concentration of IBA-derived auxin from 0.5 to 1.0 mg/L. It decreased from 4.2–4.4 cm to 4.1–4.2 cm for Arctic bramble. Cultivar differences in the total root length were not significant (table 7).

Table 7

The total root length of high-half blueberry and Arctic bramble depending on the cultivar and IBA-derived auxin concentration, cm

Species	Cultivar	IBA-derived auxin concentration, mg/L		LSD ₀₅
		0.5	1.0	
High-half blueberry	Northblue	3.0	5.3	0.74
	Northcountry	3.1	5.1	0.93
Arctic bramble	Anna	4.2	4.1	0.69
	Sofia	4.4	3.7	0.97

Thus, a change in the concentration of IBA-derived auxin influenced the number of roots, the average root length and the total root length of high-half blueberry and Arctic bramble plants.

Conclusion

The following conclusions can be drawn according to the research results. Chloride-free ecosterilizer and bleaching agent with an exposure of 15 and 20 min showed quite high efficiency in surface sterilization of explants of high-half blueberry and Arctic bramble. The explants viability of the studied berry plants was high during sterilization with a 0.1 % mercuric chloride solution and an exposure of 15 min, and it sharply decreased with an exposure of 20 min.

An increase in the concentration of cytokinin 6-BAP from 0.5 to 1.0 mg/L on the WPM medium contributed to an increase in the number and total length of shoots of high-half blueberry and Arctic bramble, while the average shoot length slightly decreased. Therefore, it's advisable to add cytokinin 6-BAP at the concentration of 1.0 mg/L to the nutrient medium at the stage of micropropagation itself.

The number of roots of the studied berry plants increased, and its average root length decreased slightly with an increase in the concentration of IBA-derived auxin from 0.5 to 1.0 mg/L. The total root length of high-half blueberry increased and decreased for Arctic bramble. Therefore, it is rational to add 1.0 mg/L of IBA-derived auxin for half-high blueberry, and 0.5 mg/L of IBA-derived auxin for Arctic bramble when cloning at the *in vitro* rooting stage.

REFERENCES

1. Гладкова Л.И. Выращивание голубики и клюквы. М.: ВНИИТЭИСХ. 1974. 64 с. [Gladkova L.I. *Growing of Blueberry and Cranberry*. Moscow, VNIITEISKh Publ., 1974. 64 p.]
2. Кошечев А.К., Смирняков, Ю.И. Лесные ягоды: справочник. М.: Экология, 1992. 270 с. [Koshcheyev A.K., Smirnyakov Yu.I. *Wild Berries: A Handbook*. Moscow, Ekologiya Publ., 1992. 270 p.]
3. Куминов Е.П. Нетрадиционные садовые культуры. Мичуринск, 1994. 358 с. [Kuminov E.P. *Unconventional Garden Crops*. Michurinsk, 1994. 358 p.]

4. Николаев И., Николаева Ю. Княженика – забытая ягода // Наука и жизнь. 1997. № 8. С. 130–131. [Nikolayev I., Nikolayeva Yu. Arctic Bramble – A Forgotten Berry. *Nauka i Zhizn'* [Science and Life], 1997, no. 8, pp. 130–131].

5. Тяк Г.В., Макаров С.С., Калашникова Е.А., Тяк А.В. Размножение и культивирование княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) // Плодоводство и ягодоводство России. 2018. Т. 52. С. 95–99. [Tyak G.V., Makarov S.S., Kalashnikova E.A., Tyak A.V. Reproduction and Cultivation of the Arctic Bramble (*Rubus arcticus* L.). *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* [Pomiculture and small fruits culture in Russia], 2018, vol. 52, pp. 95–99].

6. Тяк Г.В., Makeev В.А., Курлович Л.Е., Makeeva Г.Ю., Тяк А.В. Перспективы культивирования и селекции лесных ягодных растений в Костромской области // Природа Костромского края: современное состояние и экомониторинг: материалы регион. конф. (Кострома, 24–25 марта 2017 г.). Кострома: Изд-во КГУ, 2017. С. 146–151. [Tyak G.V., Makeev V.A., Kurlovich L.E., Makeeva G.Yu., Tyak A.V. Prospects of Forest Berry Plants Cultivation and Breeding in the Kostroma Region. *Proceedings of the Regional Conference "Nature of the Kostroma Region: Modern State and Ecomonitoring"*, Kostroma, March 24–25, 2017. Kostroma, 2017, pp. 146–151].

7. Черкасов А.Ф., Миронов К.А., Шутов В.В., Тяк Г.В., Веремьева С.С., Makeev В.А., Makeeva Г.Ю., Рыжова Н.В. Недревесные лесные ресурсы Костромской области: дикорастущие плоды и ягоды, лекарственные растения и грибы: науч. моногр. / под ред. В.В. Шутова и др. Кострома: Изд-во КГУ, 2006. 250 с. [Cherkasov A.F., Mironov K.A., Shutov V.V., Tyak G.V., Verem'yeva S.S., Makeyev V.A., Makeyeva G.Yu., Ryzhova N.V. *Non-Timber Forest Resources of the Kostroma Region: Wild Fruits and Berries, Medicinal Plants and Mushrooms*: Scientific Monograph. Ed. by Shutov et al. Kostroma, KSTU Publ., 2006. 250 p.].

8. *Blueberry Nursery Stock. Commercial Growers Catalog & Price List*. Oregon, Fall Creek Farm & Nursery Inc., 2000. 20 p.

9. Bomser J., Madhavi D.L., Singletary K., Smith M.A.L. *In Vitro* Anticancer Activity of Fruit Extracts from *Vaccinium* Species. *Planta Medica*, 1996, vol. 62(3), pp. 212–216. DOI: [10.1055/s-2006-957862](https://doi.org/10.1055/s-2006-957862)

10. Hildreth A.C. Propagation of the Lowbush Blueberry. *American Society for Horticultural Science*, 1929, vol. 26, pp. 91–92.

11. Jamieson A.R., Nickerson N.L. Field Performance of the Lowbush Blueberry Propagated by Seed, Stem Cuttings and Micropropagation. *Acta Horticulturae*, 2003, vol. 626, pp. 423–428. DOI: [10.17660/ActaHortic.2003.626.58](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.626.58)

12. Karp K., Starast M., Värnik R. The Arctic Bramble (*Rubus arcticus* L.) – The Most Profitable Wild Berry in Estonia. *Baltic Forestry*, 1997, vol. 3, no. 2, pp. 47–52.

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

14. Paal T. Cultivation of *Vaccinium angustifolium* from Seed. *Proceedings of the International Conference "Problems of Rational Utilization and Reproduction of Berry Plants in Boreal Forests on the Eve of the 21 Century"*, Glubokoye-Gomel, Belarus, September 11–15, 2000. Gomel, Forest Institute NASB, 2000, pp. 193–196.

15. Pirinen H., Dalman P., Kärenlampi S., Tammisola J., Kokko H. Description of Three New Arctic Bramble Cultivars and Proposal for Cultivar Identification. *Agricultural and Food Science in Finland*, 1998, vol. 7, no. 4, pp. 455–468. DOI: [10.23986/afsci.5608](https://doi.org/10.23986/afsci.5608)

16. Ragnar M., Rytönen P., Hedh J. *Åkerbär*. Luleå, Sweden, Black Island Books, 2017. 169 p.

17. Read P.E., Economou A.S., Hartley C.A., Grout J.M., Fellman C.D. A Summary of Stock Paint Influences on Woody Plant Tissue Culture Success with Special Emphasis

on the *Ericaceae*. *Acta Horticulturae*, 1988, vol. 227, pp. 476–478. DOI: [10.17660/ActaHortic.1988.227.98](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1988.227.98)

18. Strik B.C., Yarborough D.E. Blueberry Production Trends in North America, 1992 to 2003, and Predictions for Growth. *HortTechnology*, 2005, vol. 15, iss. 2, pp. 391–398. DOI: [10.21273/HORTTECH.15.2.0391](https://doi.org/10.21273/HORTTECH.15.2.0391)

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

20. Yarborough D.E. Cultivated Lowbush Blueberry (*Vaccinium angustifolium*) Establishment and Management. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2009, vol. 31(5), pp. 556–560.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ЛЕСНЫХ ЯГОДНЫХ РАСТЕНИЙ МЕТОДОМ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ВЫРАБОТАННЫХ ТОРФЯНИКОВ

С.С. Макаров¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. комп.; *ResearcherID*: [AAB-4651-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),

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

И.Б. Кузнецова², канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),

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

А.И. Чудецкий¹, вед. инж.; *ResearcherID*: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>

С.А. Родин³, д-р с.-х. наук, акад. РАН, заместитель директора по НИР;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8947-9809>

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

²Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Учебный городок, д. 34, Караваяевская с/а, п. Караваяево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; e-mail: sonnereiser@yandex.ru

³Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202

Аннотация. Приведены результаты исследований по совершенствованию технологии получения высококачественного посадочного материала голубики полуввысокой и княженики арктической методом клонального микроразмножения. Создание плантации лесных ягодных растений в районах добычи торфа позволяет снизить ущерб, наносимый окружающей среде, и значительно повысить эффективность лесной промышленности. В последние десятилетия в России и других странах мира растет интерес к созданию на осушенных и освоенных торфяниках насаждений лесных ягодных растений, для успешного выращивания которых в промышленных масштабах необходимо использовать сортовой посадочный материал. Наиболее эффективный метод (из вегетативных) его разведения – клональное микроразмножение, позволяющее в условиях небольшой лабораторной площади круглый год получать огромное количество оздоровленного посадочного материала. Экостерилизатор бесхлорный и отбеливающее средство на основе гипохлорита натрия «Белизна» показали высокую эффективность при стерилизации эксплантатов голубики полуввысокой и княженики арктической с выдержкой 15 и 20 мин. Наиболее высокая жизнеспособность эксплантов исследуемых лесных ягодных культур отмечена при стерилизации 0,1 % раствором хлорида ртути и

выдержке 15 мин, низкая – при выдержке 20 мин. На стадии собственно микроразмножения при повышении концентрации цитокинина 6-БАП с 0,5 до 1,0 мг/л на питательной среде WPM увеличивалось количество побегов у регенерированных растений голубики полуввысокой (сортов Northcountry и Northblue) и княженики арктической (сортов Anna и Sofia). На стадии укоренения *in vitro* отмечено влияние концентрации ауксина ИМК на количество и длину корней регенерированных растений.

Для цитирования: Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I., Rodin S.A. Obtaining High-Quality Planting Material of Forest Berry Plants by Clonal Micropropagation for Restoration of Cutover Peatlands // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 21–29. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-21-29

Ключевые слова: княженика арктическая, клональное микроразмножение, сорт, выработанные торфяники, регулятор роста, голубика полуввысокая, *in vitro*.

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

Поступила 05.02.20 / Received on February 5, 2020

УДК 581.5:58.087

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-30-44

ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ РАЗНЫХ ФОРМ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ИЗБЫТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВ

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

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

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

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: tarkse@yandex.ru, aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru

Аннотация. Внутрипопуляционная изменчивость биохимических признаков и камбиального роста отражает адаптационную способность деревьев сосны в разных условиях произрастания. В неблагоприятных условиях среды у них наблюдается генетически детерминированный процесс активации защитных систем. Структурно-функциональная перестройка ассимиляционного аппарата в связи с сезонным развитием обеспечивает повышение устойчивости деревьев и прохождение онтогенеза при воздействии стрессовых факторов в пределах нормы реакции. Целью исследований является изучение адаптационной способности сосны (*Pinus sylvestris* L.), различающейся формой апофиза семенных чешуй, в условиях длительного избыточного увлажнения почв северной тайги. Исследования проводили в кустарничково-сфагновых сосняках на болотных верховых торфяных почвах в устье р. Северная Двина. На пробных площадях выделяли деревья с элементарными вариациями (формами) апофиза семенных чешуй. Для определения биохимических признаков у 10 деревьев каждой из форм сосны, выделенных по типу апофиза, в разные календарные периоды (с мая по декабрь 2016 г.) отбирали образцы хвои 1, 2 и 3-летнего возраста. Спектрофотометрическим методом в хвое устанавливали содержание свободного пролина, водорастворимых белков, аскорбиновой кислоты. У 52 деревьев каждой из выделенных форм на высоте 1,3 м отбирали керны древесины и определяли ширину годичного слоя. Наряду с абсолютной величиной радиального прироста рассчитывали относительные дендрохронологические показатели. Метеорологические показатели на объектах исследований (температуру воздуха и количество осадков) определяли по данным метеостанции «Архангельск». В результате проведенных исследований выявлены сходство и различия деревьев неодинаковых форм в сезонной динамике содержания стрессовых метаболитов в хвое разного возраста в связи с метеорологическими факторами и фенологическими фазами развития вегетативных органов сосны в устье Северной Двины. Показано, что деревьям с «плоской» формой апофиза свойственно более интенсивное накопление в конце октября аскорбиновой кислоты и пролина в 2-летней хвое. Это свидетельствует о большей активации их защитных реакций перед перезимовкой по сравнению с деревьями с «выпуклой» формой апофиза. Установлены закономерности изменчивости камбиального роста деревьев разных форм во временных рядах. Выявлено, что деревья с плоской формой апофиза испытывают более сильное воздействие дезадаптирующих (стрессовых) факторов внешней среды.

Для цитирования: Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Особенности адаптации разных форм сосны обыкновенной в условиях длительного избыточного увлажнения почв // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 30–44. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-30-44

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

Ключевые слова: сосна обыкновенная, форма апофиза семенных чешуй, биохимические показатели, радиальный прирост, адаптация, длительное избыточное увлажнение почвы.

Введение

Растения реагируют на стресс развитием устойчивости, что подразумевает биохимические, физиологические и морфологические изменения [36]. Известно, что растения используют ряд стратегий для адаптации метаболизма к неблагоприятным условиям среды и устойчивость к стрессу не ограничивается одним соединением или механизмом [34, 39].

Длительное избыточное увлажнение почвы приводит к корневой гипоксии, что вызывает нарушение кислородного режима в тканях древесных растений. В этих условиях деревья испытывают хронический стресс, который сопровождается изменением метаболических реакций у всего растительного организма [43]. При гипоксическом стрессе (не у всех видов и тканей древесных растений) наблюдаются повышение содержания сахаров, крахмала, аминокислот, белков, органических кислот анаэробной части цикла Кребса [15, 28, 32], этилена (у устойчивых к затоплению древесных растений [41]), снижение концентрации фосфосахаров, АДФ, АТФ [42]. При неблагоприятных условиях среды происходит накопление ацетилсалициловой кислоты в хвое сосны обыкновенной [16].

Процессы роста древесных растений, определяющие уровень их продуктивности, лимитируются экологическими условиями. Величина текущего прироста деревьев по диаметру ствола отражает аддитивное воздействие климатических, эдафических, ценологических и других факторов [7]. Колебания радиального прироста рассматриваются как результат адаптации древесных растений к изменяющимся условиям среды [23]. Вместе с тем внутривидовые формы сосны имеют различия в возрастной динамике радиального прироста, обусловленные их наследственными свойствами [18, 24]. На болотных почвах (т. е. в условиях длительного избыточного увлажнения) наблюдается ослабление камбиальной активности и замедление роста сосны. Одной из причин этого является низкая концентрация ауксинов в ее тканях в период вегетации [16].

Наиболее надежные морфологические маркеры наследственных признаков древесных растений – это характеристики генеративных органов. В частности, у рода *Pinus* наряду с другими проявлениями к ним можно отнести форму апофиза семенных чешуй шишек [8, 12, 14]. Различные формы имеют генетические особенности и могут по-разному реагировать на действие стрессовых факторов, что отражается на состоянии деревьев, их росте, репродуктивной способности и в целом на воспроизводстве и общей устойчивости популяций в разных экологических условиях. Тип семенных чешуй у многих видов семейства *Pinaceae* несет наибольший объем генетической информации, свойственный как самому виду, так и его внутривидовым формам, являясь

надежным феном при установлении таксономического положения [1]. Этот дискретный признак широко используется в диагностике и селекции внутривидовых разновидностей сосны обыкновенной [13].

Цель исследования – изучение адаптационной способности сосны (*Pinus sylvestris* L.), различающейся формой апофиза семенных чешуй, в условиях длительного избыточного увлажнения почв северной тайги.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в северотаежных кустарничково-сфагновых сосняках на болотных верховых торфяных почвах северной тайги устья р. Северная Двина. На пробных площадях, заложенных стандартными методами [10], выделяли деревья с элементарными вариациями (формами) апофиза семенных чешуй [14]. Для определения биохимических признаков у 10 деревьев каждой из форм, выделенных по типу апофиза (f. *gibba* Christ – «выпуклый», f. *plana* Christ – «плоский»), в 2016 г. отбирали образцы хвои 1, 2 и 3-летнего возраста. Учитывая сезонную изменчивость этих признаков, отбор образцов производили у одних и тех же деревьев в следующие периоды роста побегов: начало (середина мая), активный рост (конец июня), завершение роста в длину (середина июля), окончание вегетации (конец второй декады сентября), перед перезимовкой (конец октября), зимой (середина декабря). У 52 деревьев каждой из выделенных форм на высоте 1,3 м отбирали керны древесины. При этом различия деревьев в возрасте в подавляющем большинстве случаев не превышали 20 лет.

В лабораторных условиях спектрофотометрическим методом (с использованием спектрофотометра Nano Drop 2000 C) у разных форм сосны в хвое определяли содержание свободного пролина [25], водорастворимых белков (по методу Kalb, Bernlohr [4]), аскорбиновой кислоты [9]. Методом световой микроскопии (с точностью $\pm 0,05$ мм) измеряли ширину годичного слоя в двух взаимно перпендикулярных направлениях по сторонам света (С–Ю, В–З) [23, 27]. Перекрестную датировку осуществляли с использованием указательных дат. Колебания длины временных рядов радиального прироста не превышали 10 лет. Дендрохронологический анализ проводили с использованием средних значений годичного прироста каждого дерева и усредненных рядов абсолютного прироста разных форм сосны.

Степень надежности хронологии определяли с помощью критерия выраженного сигнала популяции (EPS – Expressed Population Signal), значение которого показывает, в какой степени реальная хронология отражает гипотетическую, представленную бесконечным количеством деревьев [26]. Методом 5-летнего скользящего сглаживания рассчитывали индекс прироста, обеспечивающий удаление возрастного тренда [3]. Для характеристики амплитуды колебаний прироста применяли коэффициент «чувствительности» дерева [22, 30]. Учитывая довольно невысокие значения этого коэффициента, в отдельные временные периоды дополнительно определяли индекс «стресса» [2]. Биологический смысл этого индекса заключается в отражении силы реакции дерева на воздействие дезадаптирующего фактора (стресса), проявляющейся в резком колебании радиального прироста и образовании аномальных по ширине колец древесины, компенсирующих технические перегрузки или повреждения.

Градацию значений индекса стресса (I_s) проводили по методике С.П. Арефьева [2]: $I_s < 0,20$ – низкий; $I_s = 0,20–0,29$ – средний; $I_s = 0,30–0,39$ – высокий; $I_s > 0,40$ – очень высокий уровень стресса. Метеорологические показатели на объектах исследований (температура воздуха, количество осадков) определяли по данным метеостанции «Архангельск».

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что сезонная динамика физиолого-биохимических процессов имеет решающее значение при адаптации и развитии устойчивости древесных растений к воздействию внешних факторов [45]. Аскорбиновая кислота наряду с другими соединениями участвует в регуляции окислительно-восстановительного потенциала, с которым связана активность многих ферментов и физиолого-биохимических реакций, в том числе таких жизненно необходимых, как фотосинтез и дыхание. Содержание этого вещества зависит от условий произрастания и физиологического состояния растений [21]. Показано его участие в адаптивных реакциях деревьев [5]. Анализ средних значений выявил существенные сезонные различия по содержанию аскорбиновой кислоты в хвое 1, 2 и 3-летнего возраста у деревьев сосны с разной формой апофиза семенных чешуй между летними месяцами и декабрем (t-критерий; $p < 0,05$) (рис. 1). В зимний период наблюдается снижение ее концентрации.

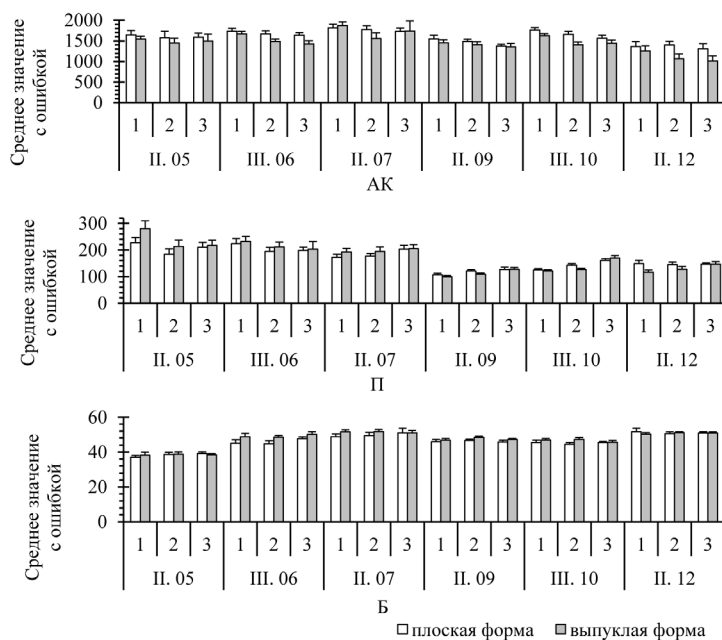


Рис. 1. Сезонная динамика биохимических параметров хвои в 2016 г. (содержание $\mu\text{г}\cdot\text{г}^{-1}$ воздушно-сухой массы: АК – аскорбиновой кислоты; П – пролина; Б – водорастворимых белков; 1, 2, 3 – 1, 2 и 3-летняя хвоя соответственно; II. 05 – II. 12 – декада. месяц)

Fig. 1. Seasonal dynamics of the needle biochemical parameters in 2016 (content, $\mu\text{g/g}$ air dry weight: АК – ascorbic acid; П – proline; Б – water-soluble proteins; 1, 2, 3 – 1, 2, 3-year-old needles, respectively; II. 05–II. 12 – ten-day period and month)

Характер сезонной динамики содержания аскорбиновой кислоты в 1-летней хвое в 2016 г. отличается от изменчивости ее концентрации в 2014 и 2015 гг., когда наибольшее содержание наблюдалось в осенний период [18, 19]. В 2016 г. наибольшее содержание аскорбиновой кислоты в хвое деревьев разных форм отмечалось в июле. В этом году данный месяц отличался более высоким количеством осадков (118,7 мм) по сравнению с июлем 2015 г. (44,5 мм) и 2014 г. (8,0 мм) и средними многолетними показателями (64,0 мм). По-видимому, динамика накопления аскорбиновой кислоты зависит от метеорологических условий в тот или иной год. Большое количество осадков летом способствует повышению дефицита кислорода в верхнем слое почвы, что приводит к усилению корневой гипоксии у деревьев сосны. Это активизирует накопление аскорбиновой кислоты как антиоксиданта растительных клеток. Уменьшение ее содержания в период зимнего «покоя» связано со снижением активности физиолого-биохимических процессов у сосны и уменьшением роли этого соединения в регуляции окислительно-восстановительного потенциала. По мере прохождения процессов закалывания и осенней подготовки к перезимовке защитные реакции сосны замедляются. У сосны с плоской формой апофиза накопление аскорбиновой кислоты перед перезимовкой (конец октября) происходит более интенсивно по сравнению с сосной, имеющей выпуклую форму апофиза (t -критерий, $p < 0,05$). Это свидетельствует о более высокой активности работы антиоксидантной системы дерева. У сосны с выпуклым апофизом в конце июня содержание аскорбиновой кислоты в однолетней хвое существенно больше, чем в хвое трехлетнего возраста ($t > t_{0,05}$). У сосны с плоской формой апофиза эти различия недостоверны на 5 %-м уровне значимости ($t < t_{0,05}$). Более высокое содержание аскорбиновой кислоты в молодой хвое по сравнению с более старой хвоей у сосны с выпуклым типом апофиза свидетельствует о ее большей физиолого-биохимической активности в этот период.

Аминокислоты в процессе биосинтеза древесины у многолетних древесных пород, с одной стороны, участвуют в составе белков клеточных стенок, с другой – значительное их количество используется на построение белковых структур цитоплазмы клеток вновь формирующихся побегов и клеток годичного слоя [16]. Пролин, который накапливается в органах многих видов растений из-за нестабильности экологической ситуации, часто оценивается как стрессовый маркер [38]: может выступать в качестве сигнальной молекулы, быть модулятором пролиферации и гибели клеток [40]. У обеих форм установлены существенные различия содержания пролина в хвое одного возраста между весенне-летним и осенне-зимним периодами в 2016 г. (t -критерий; $p < 0,05$). Концентрация пролина в 1, 2 и 3-летней хвое в весенне-летний сезон больше. Ранее нами отмечалось [19] повышенное содержание пролина в 1-летней хвое в период весеннего развития у деревьев сосны разных форм (в конце мая–начале июня 2013–2015 гг.). Увеличение количества свободных аминокислот (в том числе пролина) может происходить как из-за разрушения, так и из-за ингибирования синтеза белков [16]. В весенний период повышается уровень почвенных вод. В июле 2016 г. выпало большое количество осадков (почти в 2 раза выше нормы). Все это способствовало усилению корневой гипоксии и, как следствие, развитию защитных реакций у деревьев сосны в весенне-летний сезон.

Концентрация пролина в хвое разного возраста может значительно различаться. У сосны с выпуклой формой апофиза в хвое 3-летнего возраста концентрация пролина осенью больше по сравнению с 1- и 2-летней хвоей (t -критерий; $p < 0,05$). У деревьев с плоской формой апофиза перед перезимовкой (конец

октября) содержание пролина в хвое 1-летнего возраста существенно меньше, чем в 2- и 3-летней хвое ($t > t_{0,05}$). Это свидетельствует об активации защитных реакций более старой хвои в осенний период. Установлены существенные различия концентрации пролина в 2-летней хвое перед перезимовкой (конец октября) между выборками деревьев разных форм ($t > t_{0,05}$). В хвое сосны с плоской формой апофиза концентрация пролина в этот период больше по сравнению с сосной с выпуклым апофизом. Увеличение концентрации пролина в хвое свидетельствует о повышении роли его антиоксидантных функций в ответ на экологический стресс [38].

В процессе адаптации растений, в том числе хвойных, к изменяющимся условиям происходит формирование новых изоэнзимов или стрессовых белков [33, 35, 37]. В хвое одного и того же возраста у обеих форм сосны установлены достоверные различия между концентрацией водорастворимых белков в мае и их содержанием в другие месяцы (t -критерий; $p < 0,05$). Довольно выраженный весенний минимум содержания водорастворимых белков в 1, 2 и 3-летней хвое у деревьев обеих форм может указывать на их нормальное физиологическое состояние в этот период. Май 2016 г. в районе исследования был почти в 2 раза теплее (температура $t = 11,5$ °C) обычного ($t = 6,0$ °C). Сумма осадков в этот месяц была ниже (22 мм) нормы приблизительно в 2 раза (46 мм). Очень теплая и сухая весна способствовала активации физиологических процессов весеннего развития сосны, произрастающей на избыточно увлажненной почве. Эти условия (в первую очередь повышение температуры) замедляли синтез водорастворимых белков в данный период. Увеличение их содержания в другие месяцы свидетельствует об активации защитных реакций деревьев [11]. Можно предполагать, что значительное повышение содержания водорастворимых белков в июле обусловлено увеличением дефицита кислорода для корневой системы сосны в связи с большим количеством осадков, выпавших в этом месяце в 2016 г. Существенное увеличение концентрации этих веществ в зимний период связано со сменой фенологического состояния деревьев при переходе к зимнему покою [17]. Предполагается, что устойчивость к низким температурам обеспечивается как снижением интенсивности процессов метаболизма, так и синтезом различных соединений, в том числе белков, обладающих криозащитным действием [46]. Существенные различия содержания водорастворимых белков в хвое 1, 2 и 3-летнего возраста не установлены ($t < t_{0,05}$). Достоверные различия этого показателя между анализируемыми формами ($t < t_{0,05}$) также не выявлены.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа подтверждают достоверность данных о сезонных изменениях содержания аскорбиновой кислоты, пролина и водорастворимых белков ($F = 3,5-35,6$; $F_{0,05} = 2,3$) в хвое разного возраста у деревьев обеих форм. Влияние возраста хвои на изменчивость содержания аскорбиновой кислоты значимо в начале лета ($F = 3,18$; $F_{0,05} = 3,17$). Методом двухфакторного анализа доказано влияние возраста хвои у деревьев разных форм на накопление пролина весной и осенью ($F = 3,3-23,9$; $F_{0,05} = 3,2$).

Установлено, что показатель оценки надежности хронологий у форм с разным типом апофиза имеет высокие значения (для выпуклого – $EPS = 0,92$; для плоского – $EPS = 0,90$). Это указывает на достаточную представленность рядов радиального прироста в выборках деревьев ($EPS > 0,85$). На верховых торфяных почвах во временной динамике радиального прироста в молодом возрасте (до 20 лет) наблюдается доминирование в росте сосны с выпуклым апофизом по сравнению с плоским ($t = 8,03$; $t_{0,001} = 3,39$) (рис. 2).

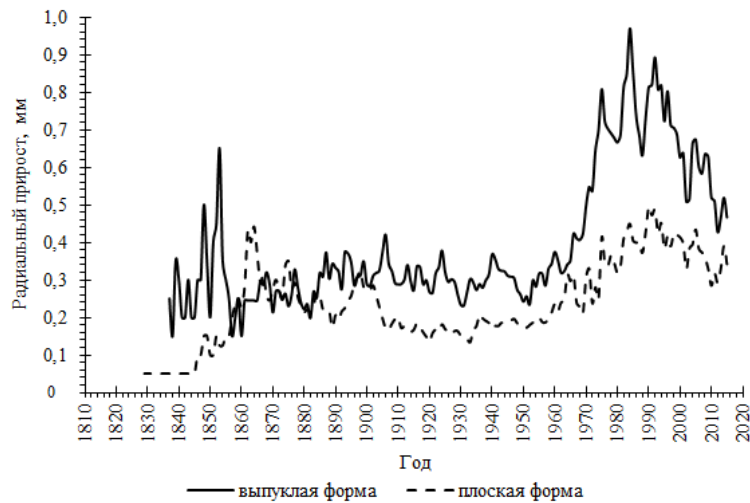


Рис. 2. Динамика радиального прироста

Fig. 2. Dynamics of radial growth

В 20–70-летнем возрасте значения этого показателя близки. С повышением возраста сосны с выпуклым типом апофиза имеет существенное преимущество в величине радиального прироста по сравнению с сосной с плоским апофизом ($t = 6,36$; $t_{0,001} = 3,39$). В возрасте 150–160 лет для обеих форм характерно снижение радиального прироста. Среднее значение радиального годовичного прироста во временном ряду деревьев сосны с плоской формой апофиза в 175–180-летнем возрасте в 2 раза ниже ($(0,32 \pm 0,02)$ мм), чем у деревьев с выпуклым апофизом ($(0,64 \pm 0,04)$ мм) ($t = 6,40$; $t_{0,001} = 3,39$). Выборочные дисперсии радиального прироста у этих форм достоверно различаются на 1-м % уровне значимости ($F = 3,28$; $F_{0,01} = 1,9$). Это соответствует ранее полученным нами результатам о преимуществе в росте сосны с выпуклой формой апофиза в 60–70-летнем возрасте в условиях длительного избыточного увлажнения почв северной тайги [20]. Вместе с тем ростовые реакции деревьев разных форм во временных рядах проявляются по-разному. Временная последовательность радиального годовичного прироста может рассматриваться, в частности, как аддитивная результирующая влияния факторов внешней среды и возрастающих биологических трендов. Последние обусловлены природой линии «большого роста» и наличием временной цикличности в приросте деревьев [6, 7].

За последние 50 лет средние значения радиального годовичного прироста на верховых торфяных почвах у сосны с выпуклой формой апофиза составляют 0,65 мм, а у сосны с плоским апофизом – 0,36 мм. Среднегодовая температура воздуха за данный период – 1,3 °С, годовая сумма осадков – 581 мм. Максимальные значения радиального прироста у сосны с выпуклым (0,97 мм) и плоским (0,45 мм) апофизом наблюдались в 1984 г. По сравнению со средними многолетними показателями в этот год отмечались повышенная температура воздуха (1,6 °С) и близкая к ним сумма осадков (606 мм). Минимальные значения радиального прироста у сосны с выпуклым (0,42 мм) и плоским (0,21 мм) типом апофиза наблюдались в 1969 г. В этот год отмечались низкая среднегодовая температура (–1,4 °С) и пониженное количество осадков (465 мм) (рис. 3).

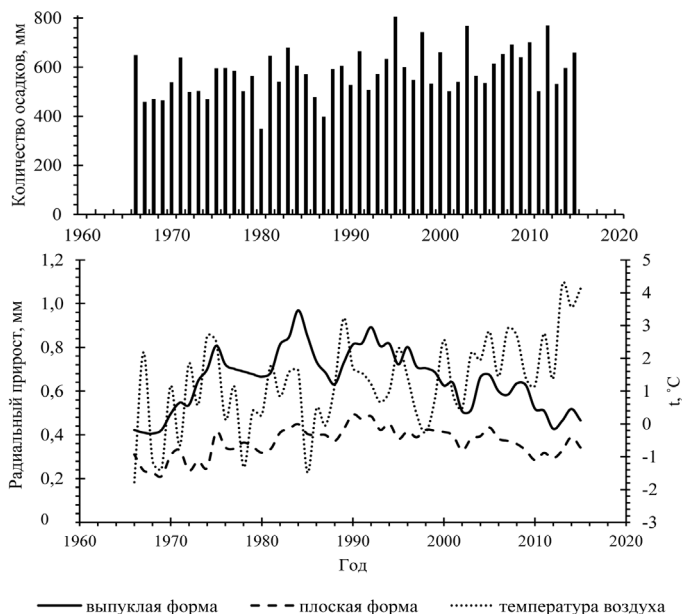


Рис. 3. Динамика радиального роста и среднегодовых значений метеопараметров

Fig. 3. Dynamics of radial growth and average annual values of meteorological parameters

Средние значения индекса радиального прироста I в выборках деревьев разных форм не различаются ($I = 101\%$), однако у сосны с выпуклым типом апофиза диапазон колебаний этого показателя несколько больше ($I = 53 \dots 167\%$), чем у сосны с плоским апофизом ($I = 71 \dots 167\%$). Средние значения коэффициента чувствительности (K_s) деревьев этих форм близки, однако минимальные и максимальные значения этого коэффициента у деревьев с выпуклым апофизом за все годы (1829–2015 гг.) и за период с 1986 по 2015 г. ниже по сравнению с деревьями с плоским апофизом (рис. 4).

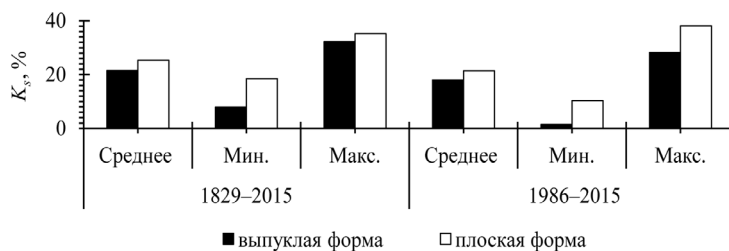


Рис. 4. Коэффициент чувствительности: среднее, минимальное и максимальное значения по годам

Fig. 4. Coefficient of tree sensitivity: average, minimum and maximum values by years

Учитывая довольно низкие значения коэффициента чувствительности радиального прироста у деревьев рассматриваемых форм сосны и руководствуясь общепринятыми представлениями [29], можно предполагать, что влияние

климатических и других внешних факторов в условиях длительного избыточного увлажнения почвы в основном проявляется довольно слабо. В результате анализа временной динамики индекса стресса, фиксирующего аномальные флуктуации годичного прироста, выявлены различия деревьев с неодинаковой формой апофиза по устойчивости к воздействию стрессовых факторов (рис. 5).

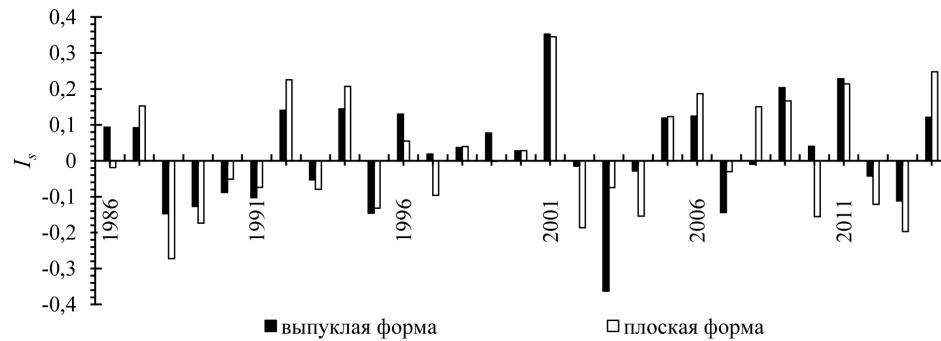


Рис. 5. Индекс стресса в период с 1986 по 2014 г.

Fig. 5. Stress index from 1986 to 2014

Среднее значение по модулю индекса стресса (за 1986–2015 г.) у сосны с выпуклым типом апофиза существенно ниже ($0,23 \pm 0,01$), чем у сосны с плоским апофизом ($0,30 \pm 0,01$) ($t = 3,64$; $t_{0,001} = 3,39$). Если ориентироваться на шкалу С.П. Арёфьева [2], то можно полагать, что деревья с плоской формой апофиза были более подвержены стрессу в этот период.

У разных форм в период с 2011 по 2015 г. выявлены умеренные положительные линейные корреляции абсолютной величины годичного прироста со среднегодовой температурой воздуха ($r = 0,46 \dots 0,55$). Установлены тесные отрицательные связи между радиальным приростом и годовой суммой осадков ($r = -0,90 \dots -0,94$; $p < 0,05$), а также количеством осадков в начале вегетации (май–июнь) ($r = -0,98 \dots -0,99$; $p < 0,05$) и за весь вегетационный период (с мая по сентябрь) ($r = -0,73 \dots -0,80$; $p < 0,05$). Следовательно, в условиях избыточного увлажнения почв северной тайги понижение температуры воздуха и увеличение количества осадков отрицательно влияют на радиальный прирост у разных форм сосны. Вместе с тем ростовые реакции деревьев разных форм на воздействие температуры воздуха в стрессовых условиях проявляются позднее. Вероятно, это связано с деятельностью регуляторов роста [44]. Известна роль ауксина в инициации камбиальной деятельности [31]. Изменение концентрации этого гормона в радиальном направлении прямо соответствует камбиальному росту [16]. По-видимому, ауксин дает положительный сигнал к развитию ксилемы [44]. Как установлено [16], хвоя болотной сосны бедна ауксином, что также может способствовать торможению реакций радиального прироста древесины на изменение температуры.

Заключение

Внутрипопуляционная изменчивость биохимических признаков и камбиального роста отражает адаптационную способность деревьев сосны в разных условиях произрастания. В неблагоприятных условиях среды у них наблюдается генетически детерминированный процесс активации защитных систем.

Большое количество осадков в июле способствует повышению дефицита кислорода в корнеобитаемой зоне почвы, что приводит к усилению корневой гипоксии деревьев сосны, вызывающей активацию аскорбиновой кислоты как антиоксиданта растительных клеток. Перед перезимовкой у деревьев с плоским типом апофиза накопление аскорбиновой кислоты происходит интенсивнее, чем у сосны с выпуклым апофизом. Это свидетельствует о более высокой активности работы ее антиоксидантной системы в этот период. Наибольшее содержание пролина наблюдается в весенний сезон, когда влияние стрессовых факторов в условиях избыточного увлажнения почвы более выражено. Судя по тому, что содержание пролина в 2-летней хвое выше, сосна с плоской формой апофиза перед перезимовкой испытывает более сильный стресс по сравнению с сосной с выпуклым апофизом. В условиях очень теплой и сухой весны синтез водорастворимых белков в хвое сосны на избыточно увлажненных почвах замедляется. Увеличение их концентрации в другие месяцы свидетельствует об активации защитных реакций деревьев сосны.

Реакции камбиального роста у деревьев, выделенных по форме апофиза, во временных рядах проявляются по-разному. Средняя величина радиального годичного прироста у сосны с плоским апофизом в 175–180-летнем возрасте значительно меньше, чем у сосны с выпуклым апофизом. Она имеет меньшие средние значения индекса стресса во временных рядах радиального прироста по сравнению с сосной с плоским апофизом. Последняя подвержена более сильному воздействию дезадаптирующих (стрессовых) факторов в данных лесорастительных условиях. Понижение температуры воздуха и увеличение количества осадков отрицательно влияют на радиальный прирост.

Различия деревьев с разной формой апофиза семенных чешуй в сезонной изменчивости содержания стрессовых метаболитов в 1, 2 и 3-летней хвое и возрастной динамике камбиального роста характеризуют особенности адаптации сосны в стрессовых условиях. Это следует учитывать при проведении селекционно-лесоводственных мероприятий, направленных на повышение устойчивости и сохранение биоразнообразия лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абатuroва М.П.* Исследование элементарных морфологических признаков ели обыкновенной // Научные основы селекции хвойных древесных пород. М.: Наука, 1978. С. 87–98. [Abaturova M.P. Study of Primary Morphological Traits of Norway Spruce. *Research Basis of Selection of Coniferous Woody Species*. Moscow, Nauka Publ., 1978, pp. 87–98].
2. *Арефьев С.П.* Оценка устойчивости кедровых лесов Западно-Сибирской равнины // Экология. 1997. № 3. С. 175–183. [Aref'ev S.P. Assessment of the Stability of the Siberian Stone Pine Forests in the Western Siberian Plain. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 1997, no. 3, pp. 175–183].

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

4. Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы / сост. М.Г. Кусакина, В.И. Суворов, А.А. Чудинова. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2012. 148 с. [Large Workshop "Biochemistry". Laboratory Classes. Content by M.G. Kusakina, V.I. Suvorov, A.A. Chudinova. Perm, PSU Publ., 2012. 148 p.].

5. Бухарина И.Л., Кузьмин П.А., Шарифуллина А.М. Содержание низкомолекулярных органических соединений в листьях деревьев при техногенных нагрузках // Лесоведение. 2014. № 2. С. 20–26. [Bukharina I.L., Kuz'min P.A., Sharifullina A.M. Organic Low Molecular Weight Compounds Contents of Tree Leaves under Technogenic Press. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2014, no. 2, pp. 20–26].

6. Ваганов Е.А., Терсков И.А. Анализ роста дерева по структуре годичных колец. Новосибирск: Наука, 1977. 93 с. [Vaganov E.A., Terskov I.A. *Analysis of Tree Growth by the Structure of Tree Rings*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 93 p.].

7. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазера В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с. [Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazera V.S. *Dendroclimatic Studies in Ural-Siberian Subarctic*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 246 p.].

8. Видякин А.И. Фены лесных древесных растений: выделение, масштабирование и использование в популяционных исследованиях (на примере *Pinus sylvestris* L.) // Экология. 2001. № 3. С. 197–202. [Vidyakin A.I. Phenotypes of Woody Plants: Identification, Scaling and Use in Population Studies (an Example of *Pinus sylvestris* L.). *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2001, no. 3, pp. 197–202]. DOI: [10.1023/A:1011310111062](https://doi.org/10.1023/A:1011310111062)

9. Воскресенская О.Л., Алябыхева Е.А., Половникова М.Г. Большой практикум по биоэкологии. Ч. 1. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2006. 108 с. [Voskresenskaya O.L., Alyabysheva E.A., Polovnikova M.G. *Large Workshop on Bioecology*. Part 1. Yoshkar-Ola, MarSU Publ., 2006. 108 p.].

10. ГОСТ 16128–70. Площади пробные лесоустроительные. Методы 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.].

11. Калугина О.В., Михайлова Т.А., Шергина О.В. Биохимическая адаптация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) к техногенному загрязнению // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 1. С. 98–110. [Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. Biochemical Adaptation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Technogenic Pollution. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2018, vol. 25, no. 1, pp. 98–110]. DOI: [10.15372/SEJ20180109](https://doi.org/10.15372/SEJ20180109)

12. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства *Pinaceae* на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с. [Mamayev S.A. *Types of Intraspecific Variability of Woody Plants (on the Example of the Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 284 p.].

13. Молотков П.И., Патлай И.Н., Давыдова Н.И. и др. Селекция лесных пород. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 224 с. [Molotkov P.I., Patlay I.N., Davydova N.I. et al. *Breeding of Forest Species*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 224 p.].

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

15. Судачкова Н.Е. Метаболизм хвойных и формирование древесины. Новосибирск: Наука, 1977. 222 с. [Sudachkova N.E. *Metabolism of Conifers and Wood Formation*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 222 p.].

16. Судачкова Н.Е., Милютина И.Л., Романова Л.И. Биохимическая адаптация хвойных к стрессовым условиям Сибири. Новосибирск: Гео, 2012. 178 с. [Sudachkova N.E., Milyutina I.L., Romanova L.I. *Biochemical Adaptation of Conifers to the Stressful Conditions of Siberia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2012. 178 p.].

17. Табаленкова Г.Н., Малышев Р.В., Кузиванова О.А., Атоян М.С. Сезонные изменения содержания растворимых белков и свободных аминокислот в почках некоторых древесных растений // Растительные ресурсы. 2019. Т. 55, № 1. С. 113–121. [Tabalenkova G.N., Malyshev R.V., Kuzivanova O.A., Atojan M.S. Seasonal Changes in Soluble Protein and Free Amino Acid Content in Buds of Some Woody Plants. *Rastitelnye Resursy*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 113–121]. DOI: [10.1134/S0033994619010126](https://doi.org/10.1134/S0033994619010126)

18. Тарханов С.Н., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Сезонная изменчивость биохимических показателей и поврежденность разных форм сосны обыкновенной в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги // Лесн. вестн. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 1. С. 5–12. [Tarkhanov S.N., Aganina Yu.E., Pakhov A.S. Seasonal Variability of Biochemical Characteristics and a Defect in the Needleless of Different Forms of *Pinus sylvestris* under Stress Conditions in the Northern Taiga. *Lesnoy Vestnik* [Forestry Bulletin], 2018, vol. 22, no. 1, pp. 5–12]. DOI: [10.18698/2542-1468-2018-1-5-12](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-1-5-12)

19. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Адаптивные реакции морфологических форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) в стрессовых условиях северной тайги (на примере Северо-Двинского бассейна) // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 4. С. 425–437. [Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E. Adaptive Responses of Morphological Forms of Pine (*Pinus sylvestris* L.) under Stressful Conditions of the Northern Taiga (in the Northern Dvina Basin). *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2018, vol. 25, no. 4, pp. 425–437]. DOI: [10.15372/SEJ20180404](https://doi.org/10.15372/SEJ20180404)

20. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аншуклова Ю.Е. Морфоструктурные особенности и изменчивость биохимических признаков форм *Pinus sylvestris* (*Pineceae*) в условиях избыточного увлажнения почв северной тайги // Растительные ресурсы. 2014. Т. 50, № 4. С. 567–578. [Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Anshukova Yu.E. Morpho-Structural Features and Variability of Biochemical Characters of *Pinus sylvestris* (*Pineceae*) Variants under Overwetting of Soils in the Northern Taiga. *Rastitelnye Resursy*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 567–578].

21. Чупахина Г.Н., Масленников П.В. Адаптация растений к нефтяному стрессу // Экология. 2004. № 5. С. 330–335. [Chupakhina G.N., Maslennikov P.V. Plant Adaptation to Oil Stress. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2004, no. 5, pp. 330–335]. DOI: [10.1023/B:RUSE.0000040681.75339.59](https://doi.org/10.1023/B:RUSE.0000040681.75339.59)

22. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 137 с. [Shiyatov S.G. *Dendrochronology of the Upper Forest Boundary in the Ural*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 137 p.].

23. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазера В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 2000. 80 с. [Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirilyanov A.V., Kruglov V.B., Mazera V.S., Naurzabayev M.M., Khantemirov R.M. *Methods of Dendrochronology*. Part 1. The Basics of Dendrochronology. Collection and Obtaining of Tree-Ring Information. Krasnoyarsk, KSU Publ., 2000. 80 p.].

24. Щекалев Р.В., Тарханов С.Н. Радиальный прирост сосны обыкновенной при аэротехногенном загрязнении в бассейне Северной Двины // Лесоведение. 2007. № 2. С. 45–50. [Shchekalev R.V., Tarkhanov S.N. The Radial Increment of *Pinus sylvestris* under Aerotechnogenic Pollution in the Severnaya Dvina River Basin. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 2, pp. 45–50].

25. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Plant and Soil*, 1973, vol. 39, iss. 1, pp. 205–207. DOI: [10.1007/BF00018060](https://doi.org/10.1007/BF00018060)
26. Cook E., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V., Jones P.D. Data Analysis. *Methods of Dendrochronology*. Ed. by E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht, Springer, 1990, pp. 97–162. DOI: [10.1007/978-94-015-7879-0_3](https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0_3)
27. Cook E.R. *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization*. Thesis, PhD in Watershed Management. Tucson, University of Arizona, 1985. 171 p. Available at: <https://lrr.arizona.edu/sites/lrr.arizona.edu/files/bibliodocs/CookER-Dissertation.pdf> (accessed 13.12.19).
28. Crawford R.M.M., Baines M.A. Tolerance of Anoxia and the Metabolism of Ethanol in Tree Roots. *New Phytologist*, 1977, vol. 79, iss. 3, pp. 519–526. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1977.tb02236.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1977.tb02236.x)
29. Ferguson C.W. A 7104-Year Annual Tree-Ring Chronology for Bristlecone Pine, *Pinus Aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bulletin*, 1969, vol. 29, no. 3-4, pp. 3–29.
30. Fritts H.C. *Tree Rings and Climate*. London, Academic Press. 1976. 567 p.
31. Hejnowicz A., Tomaszewski M. Growth Regulators and Wood Formation in *Pinus Silvestris*. *Physiologia Plantarum*, 1969, vol. 22, iss. 5, pp. 984–992. DOI: [10.1111/j.1399-3054.1969.tb07456.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1969.tb07456.x)
32. Huang B., Johnson J.W. Root Respiration and Carbohydrate Status of Two Wheat Genotypes in Response to Hypoxia. *Annals of Botany*, 1995, vol. 75, iss. 4, pp. 427–432. DOI: [10.1006/anbo.1995.1041](https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1041)
33. Kontunen-Soppela S. *Dehydrins in Scots Pine Tissues: Responses to Annual Rhythm, Low Temperature and Nitrogen*. Doctoral Dissertation. Oulu, University of Oulu, 2001. 44 p. Available at: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514259114.pdf> (accessed 13.12.19).
34. Krasensky J., Jonak C. Drought, Salt, and Temperature Stress-Induced Metabolic Rearrangements and Regulatory Networks. *Journal of Experimental Botany*, 2012, vol. 63, iss. 4, pp. 1593–1608. DOI: [10.1093/jxb/err460](https://doi.org/10.1093/jxb/err460)
35. Moffatt B., Ewart V., Eastman A. Cold Comfort: Plant Antifreeze Proteins. *Physiologia Plantarum*, 2006, vol. 126, iss. 1, pp. 5–16. DOI: [10.1111/j.1399-3054.2006.00618.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00618.x)
36. Mohr H., Schopfer P. *Plant Physiology*. Berlin, Springer, 1995. 629 p. DOI: [10.1007/978-3-642-97570-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-97570-7)
37. Oliviusson P., Salaj J., Hakman I. Expression Pattern of Transcripts Encoding Water Channel-Like Proteins in Norway Spruce (*Picea abies*). *Plant Molecular Biology*, 2001, vol. 46, iss. 3, pp. 289–299. DOI: [10.1023/A:1010611605142](https://doi.org/10.1023/A:1010611605142)
38. Roohi A., Nazish B., Nabgha-e-Amen, Maleeha M., Waseem S. A Critical Review on Halophytes: Salt Tolerant Plants. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2011, vol. 5 (33), pp. 7108–7118. DOI: [10.5897/JMPRx11.009](https://doi.org/10.5897/JMPRx11.009)
39. Sicher R.C., Barnaby J.Y. Impact of Carbon Dioxide Enrichment on the Responses of Maize Leaf Transcripts and Metabolites to Water Stress. *Physiologia Plantarum*, 2012, vol. 144, iss. 3, pp. 238–253. DOI: [10.1111/j.1399-3054.2011.01555.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2011.01555.x)
40. Szabados L., Savouré A. Proline: A Multifunctional Amino Acid. *Trends in Plant Science*, 2010, vol. 15, iss. 2, pp. 89–97. DOI: [10.1016/j.tplants.2009.11.009](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009)
41. Tang Z.C., Kozłowski T.T. Ethylene Production and Morphological Adaptation of Woody Plants to Flooding. *Canadian Journal of Botany*, 1984, vol. 62, no. 8, pp. 1659–1664. DOI: [10.1139/b84-223](https://doi.org/10.1139/b84-223)
42. Topa M.A., McLeod K.W. Responses of *Pinus Clausa*, *Pinus Serotina* and *Pinus Taeda* Seedlings to Anaerobic Solution Culture. I. Changes in Growth and Root Morphology.

Physiologia Plantarum, 1986, vol. 68, iss. 3, pp. 523–539. DOI: [10.1111/j.1399-3054.1986.tb03392.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb03392.x)

43. Tripepi R.R., Mitchell C.A. Stem Hypoxia and Root Respiration of Flooded Maple and Birch Seedlings. *Physiologia Plantarum*, 1984, vol. 60, iss. 4, pp. 567–571. DOI: [10.1111/j.1399-3054.1984.tb04929.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1984.tb04929.x)

44. Ugglä C., Mellerowicz E.J., Sundberg B. Indole-3-Acetic Acid Controls Cambial Growth in Scots Pine by Positional Signaling. *Plant Physiology*, 1998, vol. 117, iss. 1, pp. 113–121. DOI: [10.1104/pp.117.1.113](https://doi.org/10.1104/pp.117.1.113)

45. Verhoeven A. Sustained Energy Dissipation in Winter Evergreens. *New Phytologist*, 2014, vol. 201, iss. 1, pp. 57–65. DOI: [10.1111/nph.12466](https://doi.org/10.1111/nph.12466)

46. Volger H.G., Heber U. Cryoprotective Leaf Proteins. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1975, vol. 412, iss. 2, pp. 335–349.

FEATURES OF ADAPTATION OF DIFFERENT FORMS OF SCOTS PINE UNDER CONDITIONS OF PROLONGED EXCESSIVE SOIL MOISTENING

Sergei N. Tarkhanov, Doctor of Biology; Senior Research Scientist;

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

Ekaterina A. Pinaevskaya, Candidate of Biology, Research Scientist;

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

Yuliya E. Aganina, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABB-6305-2020](https://orcid.org/0000-0002-6069-8979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

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: tarkse@yandex.ru, aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru

Abstract. Intrapopulation variability of biochemical traits and cambial growth shows the adaptive ability of pine trees in different growth conditions. There is a genetically determined process of activation of defense systems in pine trees under unfavorable environmental conditions. Structural and functional rearrangement of the assimilating apparatus due to seasonal development ensures increased tree resilience and the passage of ontogenesis under the influence of stress factors within the reaction norm. This work aims at the study of adaptive ability of *Pinus sylvestris* L., which differs in the apophysis form of seed scales under conditions of prolonged excessive soil moistening in northern taiga. Studies were carried out in shrubby-sphagnum pine forests on boggy upland peat soils in the mouth of the Northern Dvina River. Trees with primary apophysis variations (forms) of seed scales were identified on the sample plots. Samples of 1, 2 and 3-year-old needles were taken in order to determine biochemical traits in 10 trees of each pine form isolated by type of apophysis, in different calendar periods (from May to December, 2016). The content of free proline, water-soluble proteins, and ascorbic acid was determined in the needles by the spectrophotometric method. Wood cores were sampled from 52 trees at a height of 1.3 m and width of the annual layer was determined in each selected form. Relative dendrochronological parameters were calculated along with the absolute value of radial growth. Meteorological parameters at the study sites (air temperature and precipitation) were determined from data of the Arkhangelsk Weather Station. The studies show the similarities and differences of trees of various forms in the seasonal dynamics of stress metabolites content in needles of different ages in relation to meteorological factors and phenological phases of pine vegetative organs in the Northern Dvina mouth. Trees with flat form of apophysis inherent more intensive accumulation of

ascorbic acid and proline in 2-year-old needles in late October. This indicates increased activation of their protective reactions before overwintering compared to trees with convex form of apophysis. Patterns of variability in cambial growth of trees of different forms in time series were found. It was observed that trees with flat form of apophysis are more strongly affected by maladaptive (stressful) environmental factors.

For citation: Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E. Features of Adaptation of Different Forms of Scots Pine under Conditions of Prolonged Excessive Soil Moistening. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 30–44. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-30-44

Funding: These studies were performed as part of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. 0409-2019-0039, state registration No. AAAA-A18-118011690221-0).

Keywords: Scots pine, apophysis form of seed scales, biochemical parameters, radial growth, adaptation, prolonged excessive soil moistening.

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

Поступила 13.12.19 / Received on December 13, 2019

УДК 630*228.8:630*221.09:630*561.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-45-55

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РУБОК УХОДА В СУХИХ СОСНЯКАХ КАЗАХСКОГО МЕЛКОСОПОЧНИКА

А.В. Данчева¹, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [AAG-7263-2019](https://orcid.org/0000-0002-5230-7288),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-7288>

В.К. Панкратов², ст. лаборант; ResearcherID: [AAG-9559-2019](https://orcid.org/0000-0001-9362-2885),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9362-2885>

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

²Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации, ул. Кирова, д. 58, г. Щучинск, Ақмолинская область, Республика Казахстан, 021704; e-mail: pankratov93_1993@mail.ru

Аннотация. Согласно действующему Лесному кодексу Республики Казахстан, в лесных насаждениях особо охраняемых природных территорий основным лесохозяйственным мероприятием, направленным на сохранение и повышение защитных функций лесов, являются рубки промежуточного пользования – рубки ухода. Одна из главных лесобразующих пород в Казахстане – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Повышение устойчивости лесных насаждений и возможность формирования рекреационно привлекательных ландшафтов посредством рубок ухода является актуальной проблемой для насаждений, произрастающих в аридных условиях. Цель исследования – проведение с использованием дендрохронологических методов анализа эффективности рубок ухода сильной интенсивности изреживания в сухих сосняках Казахского мелкосопочника за 70-летний период. Доказано, что в загущенных сосняках, произрастающих в сухих условиях, после проведения в них рубок ухода отмечается увеличение радиального прироста в каждый последующий 10-летний период после приема рубок. Со статистической достоверностью установлено, что наибольший отклик на изменения, вызываемые рубками ухода сильной интенсивности изреживания, наблюдался в период с 1949 по 1960 г. Анализ индексированных древесно-кольцевых хронологий, проведенный на основе использования региональных кривых (индексированных средних древесно-кольцевых хронологий сосны) с помощью функции кубического сплайна, позволил выявить различия в индексах радиального прироста сосны с участка, где были проведены рубки ухода сильной интенсивности изреживания, и с контрольного участка (временные периоды с 1947 по 1955 г., с 1961 по 1970 г., с 1981 по 1990 г. и с 1995 по 2015 г.). Полученные данные свидетельствуют о положительном эффекте рубок ухода сильной интенсивности изреживания на радиальный прирост деревьев в рассматриваемых сосняках. В загущенных сосняках сухих условий произрастания Казахского мелкосопочника рекомендуется проведение 1-2-приемных рубок ухода с интенсивностью изреживания 25–35 % по запасу в возрасте 20–25 и 40–50 лет соответственно с последующим проведением проходных рубок.

Для цитирования: Данчева А.В., Панкратов В.К. Оценка эффективности рубок ухода в сухих сосняках Казахского мелкосопочника // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 45–55. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-45-55

Ключевые слова: сосновые древостой, лесорастительные условия, рубки ухода, радиальный прирост, дендрохронология.

Введение

В лесах, относящихся к особо охраняемым природным территориям, на основании действующего лесного законодательства Республики Казахстан, запрещены рубки главного пользования – рубки спелого и перестойного древостоя с целью заготовки древесины [5]. Одним из основных организационно-технических мероприятий, в задачи которых входит сохранение и повышение климаторегулирующих, средообразующих, поле- и почвозащитных, водоохраных и санитарно-гигиенических функций, являются рубки ухода [7, 8, 11, 16, 22].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – одна из главных лесообразующих пород в Казахстане, а большая часть древостоев с ее участием выполняет защитные функции. В связи с этим важной становится задача получения достоверных данных о влиянии рубок ухода на устойчивость сосняков, произрастающих в засушливых условиях, и о возможности формирования рекреационно привлекательных ландшафтов посредством проведения в них рубок ухода.

Рубки ухода успешно применяются для улучшения таксационных характеристик и защитных функций древостоев. Данные мероприятия позволяют повысить пожаро- и биологическую устойчивость древостоев, снизить темпы развития корневой губки, увеличить интенсивность появления всходов и накопления подроста, предупредить естественный отпад деревьев, повысить рекреационную ценность ландшафтов и т. д. [2, 3, 12, 14, 25, 26, 27].

При оценке воздействия на лесные насаждения различного рода антропогенных факторов наиболее информативным показателем происходящих изменений является радиальный прирост деревьев [9, 13, 18, 23]. К числу достоверных методов оценки природного (климатического) или антропогенного (рекреации, пожаров, рубок и т. д.) воздействия на изменение радиального прироста и структурных показателей годичного кольца относятся дендрохронологические методы исследования.

Целью данной работы является проведение с применением методов дендрохронологии анализа эффективности рубок ухода сильной интенсивности изреживания за 70-летний период в сухих сосняках Казахского мелкосопочника.

При достаточной изученности вопроса влияния различных факторов на динамику прироста деревьев и древостоев в лесах Северного Казахстана остаются недостаточно разработанными вопросы о влиянии рубок ухода на радиальный прирост и об эффективности их проведения с различной интенсивностью изреживания с позиции повышения средозащитных функций сосновых лесов, что делает нашу работу актуальной.

В статье впервые проводится с применением дендрохронологических методов анализ влияния рубок ухода сильной интенсивности изреживания на радиальный прирост деревьев в сосняках сухих условий произрастания за 70-летний период.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали естественные сосновые древостои государственного национального природного парка (ГНПП) «Бурабай», произрастающие в центральной части Казахского мелкосопочника. Сбор экспериментального материала проведен в июле 2019 г. на опытном участке (ОУ-3),

заложенном в 1947 г. А.А. Вейсманом в сухих сосняках (группа типов леса С-2), начатые им исследования продолжил А.А. Макаренко в период с 1960 по 1990 г. на двух секциях: К-5, заложенной в качестве контрольной, и 7-5, с сильной интенсивностью изреживания (49,7 % по запасу). За период исследований (1948–1990 г.) на соответствующих секциях ОУ-3 было осуществлено 5 приемов ухода сильной интенсивности изреживания (49,7 % по запасу) в каждый прием [11]. Определение лесотаксационных параметров древостоев проводилось в соответствии с общепринятыми в лесоводстве методиками [4].

Отбор деревьев для дендрохронологического анализа влияния рубок ухода на радиальный прирост сосны обыкновенной выполнен по методике дендрохронологических исследований [18]. Образцы выбирались из числа «средних» по категории крупности, т. к. проведенные нами ранее исследования [6] позволили экспериментально доказать, что наибольший отклик на рубки ухода отмечается у деревьев указанной категории крупности (распределение по категориям осуществлялось по методике [10]).

В камеральных условиях годовые кольца сосны измеряли при помощи комплекса LINTAB 5 с точностью до 0,01 мм. Образцы были перекрестно датированы с использованием программ TSAP 3.0 [24] и COFECNA [21]. Для устранения влияния возрастного тренда и других сигналов неклиматического характера на динамику радиального прироста деревьев была выполнена в программе ARSTAN [20] стандартизация индивидуальных серий прироста. В этой же программе на основе стандартизированных индивидуальных хронологий получены обобщенные древесно-кольцевые хронологии индексов прироста. Все данные были статистически обработаны с использованием средств Microsoft Excel.

Для построения обобщенных хронологий было использовано 45 индивидуальных серий (по данным 45 модельных деревьев). Всего проанализировано 3962 колец.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуемые сосняки представлены чистыми по составу высокополнотными разновозрастными древостоями V класса возраста IV–V класса бонитета (табл. 1). На контрольной секции К-5 полнота насаждения составляет 1,9, на секции 7-5 с проведенными рубками ухода сильной интенсивности изреживания – 1,1. Почвы в сухих сосняках – слабо каменистая дресвянистая супесь – относятся к подтипу подзолистых. Живой напочвенный покров развит слабо, его общее проективное покрытие – 0,3–0,4 [1].

В ходе анализа таксационных данных установлено, что в сухих сосняках ГНПП «Бурабай» на контрольной секции (К-5) густота произрастания составляет 6 160 экз./га (табл. 1) и превышает ее нормативные значения для соответствующего возраста и класса бонитета [15] в 2,6 раза. На секции 7-5 после 5 приемов рубок ухода с сильной интенсивностью изреживания этот показатель соответствует нормативным значениям. Учитывая данные, полученные в ходе ранее проведенных исследований [6]: факт загущенности оценивался при числе стволов на 1 га, превышающем на 25 % количество таковых в нормальных древостоях по таблицам хода роста, – а также данные описанных выше исследований, сосняки сухих условий произрастания ГНПП «Бурабай» можно характеризовать как загущенные.

Таблица 1

**Таксационная характеристика сосновых древостоев ГНПП «Бурабай»
(состав 10С, класс возраста – V)**

№ секции	Средние		Густота, экз./га		Полнота		Запас, м ³ /га		Класс бонитета
	высота, м	диаметр, см	сырорастущих	сухостоя	абсолютная, м ² /га	относительная	сырорастущих	сухостоя	
К-5	11,5	11,1	4760	1400	59,8	1,9	400	20	V
7-5	13,9	15,4	2060	40	39,2	1,1	280	1	IV

Полученные в ходе анализа данных высокие показатели относительной полноты сосновых древостоев (1,7–1,9), а также результаты проведенных исследований [6, 19] свидетельствуют о необходимости уточнения стандартных таблиц хода роста сосняков Казахского мелкосопочника.

По данным дендрохронологического анализа длина полученных обобщенных хронологий деревьев сосны (рис. 1) составила 94 года (1924–2018 гг.). Древесно-кольцевые хронологии характеризуются достаточно хорошо выраженными возрастными кривыми. Период интенсивного роста сосняков – в среднем 15–20 лет (1924–1944 гг.), после чего наблюдается снижение влияния фактора возраста на ширину годичного кольца. Средняя корреляция между древесно-кольцевыми хронологиями высокая – 0,7–0,8. Значение средней чувствительности серий равное 0,25–0,30 характерно для лесостепной зоны [17].



Рис. 1. Общие дендрохронологии деревьев сосны в ГНПП «Бурабай»

Fig. 1. General dendrochronologies of pine trees in the Burabay National Park

В загущенных сосняках сухих условий произрастания ГНПП «Бурабай» после проведения рубок ухода сильной интенсивности изреживания становится общей закономерностью увеличение радиального прироста в каждый последующий 10-летний период после приема рубок. При этом можно выделить период с 1948 по 1960 г., когда наблюдается наибольший отклик значения ширины годичного кольца сосны на проводимые рубки сильной интенсивности изреживания. После 1992 года также отмечается превышение данного показателя после рубок ухода в сравнении с контролем (рис. 2).

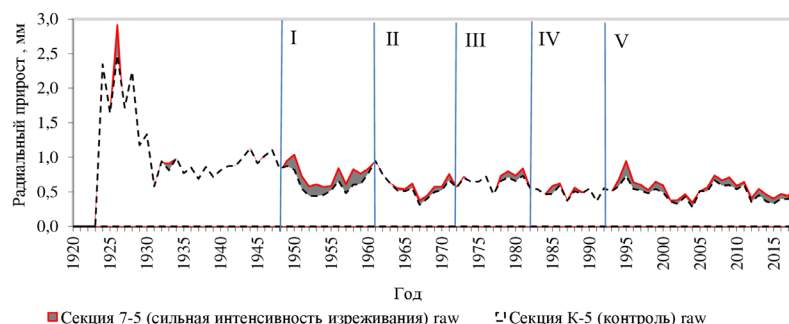


Рис. 2. Различия в величине радиального прироста сосны ГНПП «Бурабай» между контролем и секцией с проведенными рубками ухода в периоды после приемов ухода (I – 1948 г., II – 1961 г., III – 1971 г., IV – 1982 г., V – 1991 г.)

Fig. 2. Differences in the value of radial growth of pine in the Burabay National Park between the control and the section after thinning operation (I – 1948, II – 1961, III – 1971, IV – 1982, V – 1991)

Следует отметить, что средний диаметр деревьев сосны, у которых был проведен отбор экспериментального материала (кernов), на контроле (секция К-5) составляет $12,4 \pm 0,8$ см, на секции с проведенными рубками ухода сильной интенсивности изреживания (секция 7-5) – $10,9 \pm 0,7$ см. Достоверные различия между диаметрами деревьев сосны на контроле и на секциях с проведенными рубками ухода отсутствуют ($t_{\text{факт}} = 1,4$ при $t_{0,05} = 2,0$), что свидетельствует об исключении влияния данного показателя на значения величины радиального прироста.

По результатам проведенного нами анализа эффективности рубок ухода в сухих сосняках Казахского мелкосопочника установлено, что после пяти приемов рубок ухода сильной интенсивности изреживания высота и диаметр древостоя в среднем на 20 и 30 % соответственно превышают данные показатели на контрольном участке (табл. 1). Наблюдается снижение запаса древостоя на 30 % в сравнении с контролем. Следует отметить, что сосняки на рабочей секции и на контроле являются высокополнотными. Специфичность условий местопроизрастания исследуемых сосняков является одним из главных факторов, определяющих загущенность состояния древостоев к моменту достижения ими возраста спелости. Выявленное увеличение диаметра и высоты на секции с проведенными рубками ухода сильной интенсивности изреживания объясняется удалением по низовому методу отстающих в росте деревьев. Данный факт подтверждается проведенным сравнительным анализом значений радиального прироста деревьев на секциях.

В ходе статистического анализа полученных данных по оценке достоверности влияния рубок ухода сильной интенсивности изреживания на величину ширины годичного кольца была проведена группировка средних ее значений за временные периоды, следующие после приемов рубок ухода.

В загущенных сухих сосняках ГНПП «Бурабай» достоверных различий в средних значениях ширины годичного кольца деревьев за общий период их роста с 1924 по 2018 г. между контрольной секцией (К-5) и секцией с проведенными рубками ухода интенсивностью изреживания 49,7 % по запасу не отмечается ($t_{\text{факт}} = 0,4$ при $t_{0,05} = 2,0$). Статистически достоверные различия в значениях анализируемого показателя наблюдаются после первого приема рубок ухода в период с 1948 по 1960 г. ($t_{\text{факт}} = 2,1$ при $t_{0,05} = 2,0$).

Все последующие приемы рубок ухода не оказывают существенного влияния на увеличение ширины годичного кольца у деревьев на секции 7-5 до значений, по которым можно было бы утверждать о достоверности различий с аналогичным показателем на контрольной секции К-5 ($t_{\text{факт}} = 0,1-1,1$ при $t_{0,05} = 2,0$) (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения ширины годичного кольца деревьев в сосняках ГНПП «Бурабай», сгруппированных по периодам после приемов ухода

Год – прием ухода	Учетные периоды, годы	Возраст, лет	Ширина годичного кольца, мм	
			Контроль	Сильная интенсивность изреживания
–	1924–1948	5–26	1,21±0,12	1,04±0,09
1948–I	1949–1960	27–39	0,64±0,03	0,73±0,03
1961–II	1961–1971	40–51	0,58±0,04	0,58±0,04
1971–III	1972–1981	52–62	0,66±0,04	0,64±0,03
1982–IV	1982–1991	63–73	0,51±0,03	0,47±0,02
1991–V	1992–2002	74–84	0,52±0,03	0,55±0,03
–	2003–2018	85–99	0,47±0,03	0,51±0,04
–	1925–2018	99	0,72±0,05	0,69±0,04

Для исключения возможного влияния возрастного тренда на ширину годичного кольца деревьев сосны и оценки влияния рубок ухода сильной интенсивности изреживания на данный показатель в исследуемых сосняках была проведена стандартизация древесно-кольцевых хронологий сосны с получением индексированных обобщенных хронологий, содержащих более сильный сигнал и имеющих слабую автокорреляционную составляющую или не имеющих ее (рис. 3). Полученные индексированные древесно-кольцевые хронологии варьируют в пределах от 0,5 до 2,2. Эти данные были применены при оценке влияния рубок ухода на радиальный прирост сосны в исследуемых древостоях.



Рис. 3. Индексированные древесно-кольцевые хронологии сосны в сосновых древостоях ГНПП «Бурабай»

Fig. 3. Indexed tree-ring chronologies of pine in pine stands of the Burabay National Park

Дендрохронологический анализ полученных данных, представленный на рис. 3, показывает отсутствие существенных различий в индексах радиального прироста сосны (весь период роста) с контрольной секции (К-5) и секции с проведенными рубками ухода сильной интенсивности изреживания (7-5).

Для дальнейшего анализа была осуществлена индексация древесно-кольцевых хронологий с использованием функции кубического сплайна (рис. 4) с интерполяцией полученных данных на основе региональных кривых (индексированных средних древесно-кольцевых хронологий сосны на соответствующих секциях опытного участка ОУ-3).

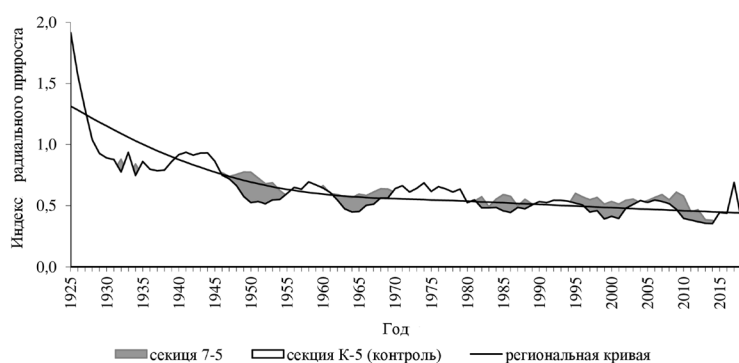


Рис. 4. Индексированные древесно-кольцевые хронологии сосны ГНПП «Бурабай» на основе применения функции кубического сплайна

Fig. 4. Indexed tree-ring chronologies of pine in the Burabay National Park based on the cubic spline function

В результате анализа данных установлены достоверные различия в индексах радиального прироста сосны с участка с проведенными рубками ухода сильной интенсивности изреживания и с контрольного в следующие временные периоды: 1947–1955 гг., 1961–1970 гг., 1981–1990 гг. и 1995–2015 гг. (рис. 4). В каждый из периодов отмечено повышение рассматриваемого показателя у сосны после проведения рубок ухода в сравнении с контролем, что, в свою очередь, свидетельствует о положительном эффекте рубок ухода сильной интенсивности изреживания на увеличение радиального прироста деревьев сосны в рассматриваемых сосняках.

При этом следует отметить, что проведенные нами ранее с использованием дендрохронологических методов исследования по оценке эффективности рубок ухода в сухих сосняках ГНПП «Бурабай» [6] выявили отсутствие достоверных различий в величине радиального прироста для контроля и секций с проведенными рубками ухода слабой и умеренной интенсивности изреживания и, как следствие, отсутствие положительного влияния рубок ухода указанной интенсивности изреживания на радиальный прирост сосны.

Заключение

Подтвержденный в ходе анализа данных за 70-летний период исследований факт загущенности сосняков государственного национального природного парка «Бурабай», произрастающих в сухих лесорастительных условиях Казахского

мелкосопочника, а также высокие значения относительной полноты древостоев (до 1,1) после проведения пяти приемов рубок ухода сильной интенсивности изреживания доказывают, что при разработке лесохозяйственных мероприятий (рубок ухода) для данной территории густота произрастания должна быть одним из главных показателей, учитываемых при подборе оптимального режима изреживания.

Высокие показатели (1,9) относительной полноты сосновых древостоев сухих условий произрастания и полученные нами ранее значения рассматриваемого показателя подтверждают необходимость уточнения и переработки стандартных таблиц хода роста сосняков на исследуемом объекте.

Дендрохронологический анализ данных выявил особенности роста сосны в сухих лесорастительных условиях: в среднем период интенсивного роста составляет 15–20 лет, после чего отмечается снижение влияния фактора возраста на ширину годичного кольца. Увеличение данного показателя наблюдается после проведения первого приема рубок ухода сильной интенсивности изреживания (49,7 % по запасу) в возрасте 25–30 лет.

Выявлено, что после проведения рубок ухода сильной интенсивности изреживания общей закономерностью становится увеличение в сравнении с контролем значения ширины годичного кольца в каждый последующий 10-летний период после приема рубок. Наибольший отклик анализируемого показателя на проводимые рубки наблюдался в период с 1948 по 1960 г. Установленные существенные различия в радиальном приросте сосны на контроле и секциях с проведенными рубками ухода подтверждены статистически.

По результатам исследования, в связи с тем, что проведение 5 приемов ухода с экономической и практической точки зрения является невыгодным, рекомендуем осуществление в загущенных (густота на 25 % и более выше нормы) сосняках Казахского мелкосопочника 1-2-приемных рубок ухода по запасу низовым методом с последующими проходными рубками ухода. В возрасте 20–25 лет предлагается выполнять первый прием рубок ухода интенсивностью изреживания 26–35 %; в возрасте 40–50 лет – второй прием рубок ухода интенсивностью изреживания 26–35 % со снижением относительной полноты древостоя до 0,7–0,8. В последующий после рубок ухода период следует проводить (по необходимости) санитарные рубки в сочетании с уходом за подростом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бирюков В.Н. Группы типов леса Казахстана. Алма-Ата: Кайнар, 1982. 44 с. [Biryukov V.N. *The Groups of Forest Types in Kazakhstan*. Alma-Ata, Kaynar Publ., 1982. 44 p.]
2. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Реакция средневозрастных сосняков на рубки ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 1. С. 28–33. [Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S. Response of Middle-Aged Pineries to Cleaning Cutting. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 1, pp. 28–33]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a53.pdf>
3. Данилов Д.А., Ковалев Н.В., Беляева Н.В. Влияние рубок ухода на рост и товарную структуру смешанных древостоев сосны и ели кисличного типа леса // Лесотехн. журн. 2014. № 2(14). С. 31–36. [Danilov D.A., Kovalev N.V., Beliaeva N.V. Effect of Thinning on Growth and Commodity Structure of Mixed Stands of Pine and Spruce of Wood-Sorrel Family Type Forests. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, no. 2(14), pp. 31–36]. DOI: [10.12737/4504](https://doi.org/10.12737/4504)
4. Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 152 с. [Dancheva A.V.,

Zalesov S.V. *Ecological Monitoring of Recreational Forest Stand Plantations*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2015. 152 p.].

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

6. Данчева А.В., Залесов С.В. Анализ эффективности рубок ухода в сухих сосняках Казахского мелкосопочника методами дендрохронологии // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Лесная наука Казахстана: достижения, проблемы и перспективы развития». Щучинск, 2017. С. 100–105. [Dancheva A.V., Zalesov S.V. Analysis of Thinning Efficiency in Dry Pine Forests of the Kazakh Uplands by Dendrochronological Methods. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Forest Science of Kazakhstan: Achievements, Problems and Prospects of Development"*. Shuchinsk, 2017, pp. 100–105].

7. Залесов С.В., Залесова Е.С., Данчева А.В., Федоров Ю.В. Опыт рубок обновления в одновозрастных рекреационных сосняках подзоны Северной лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 20–31. [Zalesov S.V., Zalesova E.S., Dancheva A.V., Fedorov Ju.V. Experience of Regeneration Fellingings in the Even-Aged Pine Forests of the Northern Forest-Steppe Subzone. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 6, pp. 20–31]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/45c/2--opyt.pdf>

8. Залесов С.В., Луганский Н.А., Бережнов В.А., Залесова Е.С. Рубки ухода в производных мягколиственных молодняках как способ формирования сосняков на Южном Урале // Вестн. БГАУ. 2013. № 4 С. 118–121. [Zalesov S., Luganskiy N., Berezhnov V., Zalesova E. Improvement Cuttings in Secondary Softwooded Young Growth as a Method of Pine Stockings Formation in the Southern Urals. *Vestnik BGAU* [Vestnik BSAU], 2013, no. 4, pp. 118–121].

9. Козлов В.А., Кистерная М.В., Неронова Я.А. Влияние лесохозяйственных мероприятий на плотность и химический состав древесины сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 6. С. 7–13. [Kozlov V.A., Kisternaya M.V., Neronova Ya.A. Influence of Forestry Measures on Density and Chemical Wood Composition of Scotch Pine. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 6, pp. 7–13]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/355/96.pdf>

10. Комин Г.Е. Изменение рангов деревьев по диаметру в древостоях // Тр. Ин-та экологии растений и животных / Урал. фил. АН СССР. 1970. Вып. 67. С. 252–261. [Komin G.E. Tree Ranks Modification by Diameter in Forest Stands. *Trudy instituta ekologii rasteniy i zivotnykh. Ural'skiy filial AN SSSR*, 1970, iss. 67, pp. 252–261].

11. Макаренко А.А., Муканов Б.М. Рубки ухода в сосняках Казахстана. Алматы: Бастау, 2002. 219 с. [Makarenko A.A., Mukanov B.M. *Thinning in Pine Forests of Kazakhstan*. Almaty, Bastau Publ., 2002. 219 p.].

12. Малышев В.В. Оптимизация режимов рубок ухода в сосновых насаждениях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2013. № 4. С. 36–41. [Malyshev V.V. Mode Optimization Thinning in Pine Plantations. *Aktual'nyye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2013, no. 4, pp. 36–41].

13. Матвеев С.М., Чеботарев В.В. Дендроклиматическое исследование сосняков Усманского бора и моделирование пожароопасных сезонов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2002. № 2. С. 37–42. [Matveev M.S., Chebotarev V.V. Dendroclimatic Study of Pine Forests of Usmansk Grove and Simulation of Fire-Hazard Seasons. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2002, no. 2, pp. 37–42]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/362.pdf>

14. Мусин Х.Г. Эффективность ландшафтных рубок в рекреационных лесах // Вестн. БГАУ. 2013. № 2. С. 115–117. [Musin H. Efficiency of Landscape Cabins in the Recreational Woods. *Vestnik BGAU* [Vestnik BSAU], 2013, no. 2, pp. 115–117].
15. Нормативы для таксации лесов Казахстана. Ч. I. Кн. II. Алма-Ата: Кайнар, 1987. 321 с. [*Standards for Forest Inventory in Kazakhstan*. Part I. Book II. Alma-Ata, Kaunar Publ., 1987. 321 p.].
16. Онучин А.А., Маркова И.И., Павлов И.Н. Влияние рубок ухода на радиальный прирост стволов и формирование сосновых молодняков // Хвойные бореальной зоны. 2011. № 3–4. С. 258–267. [Onuchin A.A., Markova I.I., Pavlov I.N. The Influence of Selective Thinning on Young Scots Pine Stand Development and Tree Radial Increment. *Hvojnyye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2011, no. 3–4, pp. 258–267].
17. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с. [Shiyatov S.G. *Dendrochronology of the Forest Line in the Urals*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 136 p.].
18. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазера В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с. [Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirryanov A.V., Kruglov V.B., Mazera V.S., Naurzabayev M.M., Khantemirov R.M. *The Methods of Dendrochronology*. Part I. The Principles of Dendrochronology. Compilation and Receiving of Tree-Ring Information. Krasnoyarsk, KrasGU Publ., 2000. 80 p.].
19. Эбель А.В., Эбель Е.И., Залесов С.В., Муканов Б.М. Влияние полноты и густоты на рост сосновых древостоев Казахского мелкосопочника и эффективность рубок ухода в них: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2014. 221 с. [Ebel' A.V., Ebel' E.I., Zalesov S.V., Mukanov B.M. *The Influence of Density and Stocking Rate on Growth of Pine Stands of the Kazakh Uplands and the Effectiveness of Thinning in Them: A Monograph*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2014. 221 p.].
20. Cook E., Holmes R. Guide for Computer Program ARSTAN, Adapted from User's Manual for Program ARSTAN. *Tree-Ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin*. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. 1986, pp. 50–65.
21. Holmes R.L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, vol. 43, pp. 69–78.
22. Huss J. Durchforstungen in Kiefernjugbeständen [Thinnings in Young Pine Plantations]. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* [European Journal of Forest Research], 1983, vol. 102, iss. 1, pp. 1–17. DOI: [10.1007/BF02741833](https://doi.org/10.1007/BF02741833)
23. Masaka K., Sato H., Torita H., Kon H., Fukuchi M. Thinning Effect on Height and Radial Growth of *Pinus thunbergii* Parlat. Trees with Special Reference to Trunk Slenderness in a Matured Coastal Forest in Hokkaido, Japan. *Journal of Forest Research*, 2013, vol. 18, iss. 6, pp. 475–481. DOI: [10.1007/s10310-012-0373-y](https://doi.org/10.1007/s10310-012-0373-y)
24. Rinn F. *TSAP Time Series Analysis and Presentation*. Version 3.0. Reference Manual. Heidelberg, 1996. 262 p.
25. Seiwa K., Eto Y., Hishita M., Masaka K. Effects of Thinning Intensity on Species Diversity and Timber Production in a Conifer (*Cryptomeria japonica*) Plantation in Japan. *Journal of Forest Research*, 2012, vol. 17, iss. 6, pp. 468–478. DOI: [10.1007/s10310-011-0316-z](https://doi.org/10.1007/s10310-011-0316-z)
26. Utsugi E., Kanno H., Ueno N., Tomita M., Saitoh T., Kimura M., Kanou K., Seiwa K. Hardwood Recruitment into Conifer Plantations in Japan: Effects of Thinning and Distance from Neighboring Hardwood Forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 237, iss. 1–3, pp. 15–28. DOI: [10.1016/j.foreco.2006.09.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.011)
27. Wu L., Liu J., Takashima A., Ishigaki K., Watanabe Sh. Effect of Selective Logging on Stand Structure and Tree Species Diversity in a Subtropical Evergreen Broad-Leaved Forest. *Annals of Forest Science*, 2013, vol. 70, iss. 5, pp. 535–543. DOI: [10.1007/s13595-013-0292-x](https://doi.org/10.1007/s13595-013-0292-x)

**EVALUATION OF THINNING EFFICIENCY IN PINERIES
OF DRY FOREST SITES OF THE KAZAKH UPLANDS**

*Anastasiya V. Dancheva*¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAG-7263-2019](https://orcid.org/0000-0002-5230-7288),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-7288>

*Vladislav K. Pankratov*², Senior Laboratory Assistant; ResearcherID: [AAG-9559-2019](https://orcid.org/0000-0001-9362-2885),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9362-2885>

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

²Kazakh Scientific Research Institute of Forestry and Agroforestry named after A.N. Bukeikhan, ul. Kirova, 58, Shchuchinsk, Akmla Region, 021704, Republic of Kazakhstan; e-mail: pankratov93_1993@mail.ru

Abstract. According to the current Forest Code of the Republic of Kazakhstan, in the forest plantations of specially protected natural areas, the main forestry measures aimed at the conservation and enhancement of the protective functions of forests are intermediate felling, that is, thinning. *Pinus sylvestris* L. is one of the main forest-forming species in Kazakhstan. Increasing the stability of forest plantations and the possibility of forming recreationally attractive landscapes through thinning is an urgent problem for plantations growing in arid conditions. The research purpose is to analyze the effectiveness of thinning of high intensity in dry pine forests of the Kazakh Uplands for a 70-year period, using dendrochronological methods. It was proved that in dense pine forests growing in dry conditions, there is an increase in radial growth in each subsequent 10-year period after thinning. It was found with statistical certainty that the greatest response to changes caused by thinning of high intensity was observed between 1949 and 1960. Analysis of indexed tree-ring chronologies using regional curves (indexed average tree-ring chronologies of pine) using a cubic spline function revealed differences in pine radial growth indices from the site where thinning of high intensity were carried out and from the control site (time periods: 1947–1955, 1961–1970, 1981–1990, and 1995–2015). The data obtained show a positive effect of thinning of high intensity on the radial growth of trees in the considered pine forests. In dense pine forests of dry growing conditions of the Kazakh Uplands it is recommended to make 1 or 2 cuttings with thinning intensity of 25–35 % at the age of 20–25 and 40–50, respectively, with subsequent increment thinning.

For citation: Dancheva A.V., Pankratov V.K. Evaluation of Thinning Efficiency in Pineries of Dry Forest Sites of the Kazakh Uplands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 45–55. DOI: 10.17238/0536-1036-2021-2-45-55

Keywords: pine stands, forest site conditions, thinning, radial growth, dendrochronology.

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

Поступила 23.12.19 / Received on December 23, 2019

УДК 582.475.4:58.05

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-56-69

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ СЕМЕНОШЕНИЯ КЕДРА СИБИРСКОГО (*Pinus sibirica* DU TOUR)

С.Н. Горошкевич, д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: [I-5084-2018](https://orcid.org/0000-0003-0805-8656).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0805-8656>

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, просп. Академический, д. 10/3, г. Томск, Россия, 634055; e-mail: pearliver@yandex.ru

Аннотация. Изучена динамика половой репродукции кедра сибирского на юге равнинной части его ареала в Томской области. Объект исследования – Нижне-Сеченовский кедровник в Томь-Обском междуречье. Постоянная пробная площадь заложена в 160–180-летнем насаждении. Учет урожая и взятие образцов шишек проводили на протяжении 13 лет в конце лета по мере их созревания. Шишки стряхивали с дерева, их число подсчитывали на земле, затем проводили их полный морфологический анализ. Развитые семена анализировали методом рентгенографии. Для определения массы взвешивали только безупречно полные семена, отобранные по рентгенограмме. Информацию о погодных условиях использовали по данным станции «Томск» Росгидромета. Главным фактором заложения шишек является сумма осадков за 2 года до начала этого процесса: с ростом суммы осадков заложение увеличивается. Однако итоговая семенная продуктивность в значительно большей мере зависит не от числа заложившихся шишек, а от успеха их дальнейшего развития. Судьбу каждой генерации определяет главным образом наличие поздних весенних заморозков в год опыления шишек. При этом решающее значение имеют только достаточно сильные заморозки с температурой ниже $-3,5$ °С. Степень негативного воздействия холода на репродуктивные структуры зависит от этапа развития шишек, т. е. от суммы эффективных (выше $+5$ °С) среднесуточных температур. Заморозок при накоплении суммы тепла больше 150 °С уничтожает шишки полностью, при $100...150$ °С – существенно снижает число фертильных чешуй и исходное число семян, при $50...100$ °С – увеличивает число аномалий в развитии семян и достоверно сокращает число полноценных семян в зрелых шишках. Существенное влияние на развитие семян оказывает также погода в начале осени за год до созревания шишек. Доля недоразвитых и пустых семян значительно повышается с увеличением средней температуры сентября. Единственный важный признак, который формируется в год созревания шишек, – это масса полных семян: он возрастает с увеличением количества осадков в период с апреля по июнь текущего года.

Для цитирования: Горошкевич С.Н. Метеорологическая обусловленность семеношения кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 56–69. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-56-69

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 18-16-00058.

Ключевые слова: кедр сибирский, динамика семеношения, погодные условия, сумма осадков, весенние заморозки.

Введение

Исследование связи роста и семеношения с погодными условиями в годичной динамике всегда привлекало внимание ученых. Основная часть публикаций посвящена анализу радиального роста ствола. Дендроклиматологические работы, за редким исключением, лишь конкретизируют и детализируют

известную закономерность: на ширину годичного кольца влияет тот климатический фактор (обычно это или тепло, или влага), который является лимитирующим в данном конкретном месте и в данное конкретное время [37, 39].

Исследованию влияния погоды на половую репродукцию лесных видов деревьев также посвящены многие публикации. Однако в них нет той ясности, которая есть в работах, освящающих вопрос о влиянии погодных условий на рост, много противоречивых и даже взаимоисключающих выводов, мало обобщений [14, 17, 19, 33, 36, 40]. Уровень погодичной изменчивости семеношения многократно выше, чем уровень изменчивости роста в тех же условиях в тот же период времени, что не может не быть следствием разной чувствительности этих двух сложных процессов к одному комплексу факторов [5].

Характеристики роста, как правило, подвержены влиянию метеорологических факторов, действующих в большие периоды времени: многие месяцы и даже годы [39]. Роль точечных скоротечных факторов невелика [37]. Долговременные тенденции в изменении погодных условий, разумеется, важны и для семеношения [16, 18, 30, 34, 36]. Однако даже при благоприятных условиях сильнейшее влияние могут оказывать факторы, которые воздействуют в течение нескольких дней и даже всего нескольких часов. Так, у представителей рода *Pinus* один поздний весенний заморозок может полностью или почти полностью погубить целую генерацию шишек [3, 8, 9, 22, 24].

Кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) занимает особое место среди бореальных видов лесных древесных растений главным образом из-за своей «орехоплодности». Его крупные и питательные семена являются не только средством возобновления вида, но и кормом для многих таежных животных, а для человека – объектом промысла и ценным продуктом питания. Поэтому анализу динамики семеношения кедра сибирского в связи с изменением погодных условий посвящено много исследований [3, 4, 8, 9–12]. Однако там рассматриваются лишь отдельные репродуктивные признаки, и при этом все они относятся к периоду относительно стабильного климата, до 1990 г. В нашем ряду наблюдений представлен весь комплекс репродуктивных признаков, который приходится на начальную, самую активную фазу современных климатических изменений. По этому материалу уже опубликованы две статьи: о погодичной изменчивости [6] и о погодичной динамике [5] семеношения.

Цель настоящей статьи – на примере 13-летнего ряда стационарных наблюдений проанализировать влияние погодных условий на весь процесс развития репродуктивных структур кедра сибирского от заложения шишек до созревания семян, а также на итоговые показатели семенной продуктивности.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – Нижне-Сеченовский кедровник в Томь-Обском междуречье на юго-востоке Томской области, крайний юг равнинной части ареала кедра сибирского. Постоянная пробная площадь, заложенная в 1990 г., описана в предыдущих работах [5, 6].

Учет урожая и сбор шишек для анализа проводили ежегодно в течение 13 лет. В разные годы число деревьев варьировало от 30 до 90 и составляло в среднем 45–55. По высоте и диаметру ствола они были отобраны пропорционально участию размерных категорий в составе насаждения. Учет урожая осуществляли

сразу же после созревания шишек, когда они легко отделяются от ветвей. Сборщики забирались на каждое дерево и стряхивали шишки длинным и тонким деревянным шестом, который в Сибири называют «шатиной», потому что им не бьют по ветвям, а лишь шатают их, не повреждая. Число полученных с каждого дерева шишек подсчитывали на земле. Методика взятия образцов и их анализа описана нами ранее [5].

Для получения информации о погодных условиях использовали данные станции «Томск» Росгидромета. Исследование зависимости погодичной динамики семеношения от погодных условий проводили методом корреляционного анализа. Рассчитывали следующие метеорологические элементы:

- месячные суммы осадков в вегетационный период (апрель–сентябрь);
- общие суммы осадков за этот же период, за 1, 1,5 и 2 года;
- сумму эффективных (выше 5 °С) температур за вегетационный период (апрель–сентябрь);
- средние месячные температуры за этот же период;
- средние декадные температуры за этот же период.

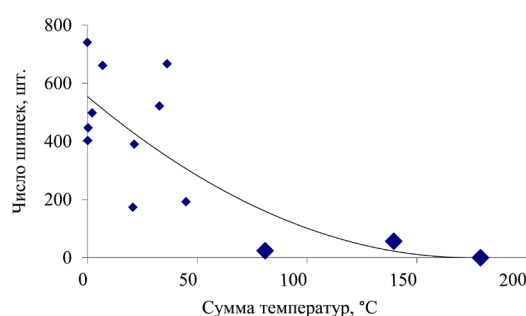
Репродуктивная фенология кедра сибирского на юге Томской области основательно изучена Т.П. Некрасовой [9, 10]. В ее публикациях есть информация о календарных сроках прохождения этапов репродуктивного цикла и их связи с накоплением суммы эффективных температур. Календарные сроки в разные годы могут отличаться на 12–14 дней, но по накоплению суммы эффективных температур срок наступления той или иной фенофазы легко предсказывается с точностью до одного дня. Так, при накоплении суммы эффективных температур 50...100 °С дифференцируются микроспорангии, 100...150 °С – формируется археспорий, 150...200 °С – обособляются микроспороциты и активно дифференцируются кроющие чешуи и т. д. В связи с этим в нашей работе широко использовалась информация о состоянии погодных условий не только в разные календарные периоды, но и на разных этапах репродуктивного цикла, которые в каждом году определялись накоплением определенной суммы эффективных температур. Корреляционные связи между показателями семеношения и метеорологическими элементами анализировались по принципу «каждый с каждым».

Результаты исследования и их обсуждение

Среднее число шишек. За период наблюдений варьировало от 0 до 740 шт./дерево. Большая часть разнообразия этого признака объяснялась суммой температур выше 5 °С, при которой в год опыления данной генерации был последний весенний заморозок от 3,1 до 4,5 °С ($r = -0,73^*$, знак * здесь и далее означает статистическую значимость связи при $P = 0,05$). Зависимость имеет сложную форму (рис. 1). Если подобное случалось при накоплении суммы тепла более 50 °С (1991, 1994, 1997 гг.), то на следующий год продукция шишек была близка к нулю (здесь и далее, на рис. 2, отмечено крупными маркерами). Если такие же заморозки происходили при накоплении меньшей суммы тепла, то они ни на что не влияли.

Рис. 1. Зависимость числа шишек на 1 дерево от суммы среднесуточных температур выше 5 °С на дату последнего весеннего заморозка от –3,0 до –4,5 °С в год опыления шишек

Fig. 1. Correlation between the number of cones per tree and the sum of mean daily temperatures above 5 °С at the date of the last spring frost with temperature from –3.0 to –4.5 °С in the year of cone pollination



Если исключить из дальнейшего анализа три года с числом шишек менее 100 шт./дерево (1992, 1995, 1998), то в оставшиеся 10 лет величина этого признака определялась следующими факторами (рис. 2):

сумма осадков за два года: вегетационный период в год заложения данной генерации шишек + 18 предшествующих месяцев ($r = 0,70^*$). Этот фактор определил низкую (от 100 до 200 шт./дерево) продукцию шишек в 1996 и 2002 гг. (сумма осадков была менее 1050 мм; крупные маркеры на рис. 2);

средняя температура сентября за год до созревания шишек ($Y = -0,81^*$).

Трем самым урожайным (более 670 шт./дерево) годам (1993, 1997, 1999 гг.) предшествовал очень холодный (менее 6,5 °С) сентябрь (крупные маркеры на рис. 2).

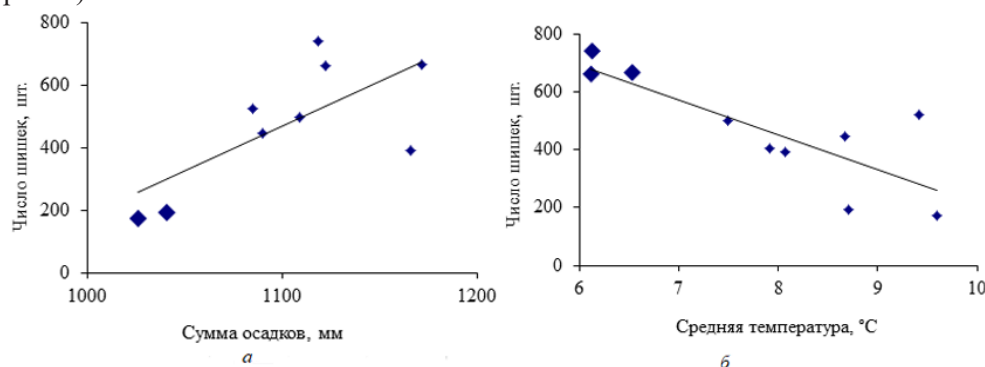


Рис. 2. Связь числа зрелых шишек на 1 дерево в выборке за 10 лет (без 1992, 1995, 1998 гг.) с суммой осадков за 2 года до их заложения (а) и средней температурой сентября за год до созревания шишек (б)

Fig. 2. Effect of the amount of precipitation during 2 years before cone initiation (a) and the average September temperature a year before cone pollination (b) on the number of mature cones per tree in the reduced sample over 10 years (without considering the lean years: 1992, 1995, 1998)

Размер и другие характеристики шишек не зависели от погоды в год их заложения. Погодные условия в год опыления, напротив, оказывали решающее влияние на качество шишек. Общее число чешуй и семяпочек сокращалось при увеличении суммы тепла в период с апреля по сентябрь ($r = -0,83^*$ и $r = -0,64^*$ соответственно). На всех без исключения этапах развития семяпочек их потери возрастали с увеличением суммы эффективных температур за вегетационный период, т. е. уменьшалось число семян на фертильную чешую и повышалась доля мелких и пустых семян, семян с ущербным эндоспермом. Коэффициенты

корреляции не достигали уровня статистической значимости. Однако все эти слабые по отдельности связи явно суммировались и в совокупности дали достоверный результат: чем больше было тепла в год опыления шишек, тем меньше в них было полных семян, когда они созрели ($r = -0,65^*$).

Температура воздуха в июне–августе совершенно не влияла ни на один из значимых признаков. Следовательно, их связь с суммой эффективных температур за вегетационный период осуществлялась исключительно через весеннюю и осеннюю погоду. Действительно, такие показатели, как размер шишек и качество семян, зависели в основном от тех же метеорологических элементов, что и число созревших шишек, т. е. от поздних весенних заморозков и от температуры сентября.

С увеличением суммы температур, при которой был сильный заморозок, убывали число чешуй в шишке ($r = -0,59^*$), доля фертильных чешуй ($r = -0,81^*$) и количество семяпочек ($r = -0,66^*$); гибель же семяпочек на разных этапах их развития, наоборот, возрастала ($r = 0,68-0,93^*$). Число полных семян в зрелой шишке в значительной мере определялось именно этим фактором ($r = 0,74^*$, рис. 3, а). Заморозок при сумме тепла более $150\text{ }^\circ\text{C}$ полностью уничтожал урожай шишек следующего, 1992 г. Если такой заморозок происходил при сумме тепла более $75\text{ }^\circ\text{C}$, но до $150\text{ }^\circ\text{C}$, то резко снижалось базовое число семяпочек и наблюдалась их повышенная абортивность на разных стадиях развития (1995 и 1998 гг.). Наконец, мороз при сумме тепла от 25 до $75\text{ }^\circ\text{C}$ на число чешуй в шишке и базовое число семяпочек совершенно не влиял, но гибель последних заметно увеличивалась (1996, 1999, 2001 гг.).

Слабые заморозки, тем более резкие колебания температур внутри положительных значений, которые часто случались даже при очень высокой (до $300\text{ }^\circ\text{C}$) сумме температур, никак не влияли на формирование репродуктивных структур. Такие обычные для мая и июня явления, как аномальная жара, дефицит или профицит осадков, даже если они отмечались конкретно в период опыления, совершенно не влияли ни на один из элементов структуры урожая.

Теплый сентябрь отрицательно влиял на количество и качество семян. Статистически значимая зависимость от средней температуры этого месяца обнаружена у такого важного признака, как число полноценных семян в зрелой шишке ($r = 0,74^*$, рис. 3, б).

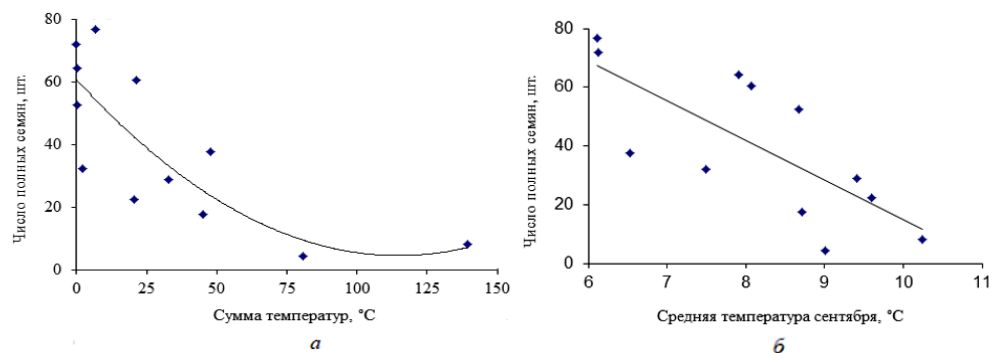


Рис. 3. Связь числа полных семян в зрелой шишке с погодными условиями в предшествующем году: а – сумма температур выше $5\text{ }^\circ\text{C}$ на дату последнего весеннего заморозка от -3 до $-4,5\text{ }^\circ\text{C}$; б – температура воздуха в сентябре

Fig. 3. Effect of weather conditions in previous year on the number of full seeds per mature cone: а – the sum of mean daily temperatures above $5\text{ }^\circ\text{C}$ at the date of the last spring frost with temperature from -3.0 to $-4.5\text{ }^\circ\text{C}$; б – air temperature in September

Погодные условия в год созревания шишек не влияли на их размер и структуру. Только масса полного семени зависела от количества осадков с октября прошлого по август текущего года ($r = 0,62^*$). При расчете суммы осадков за 3 месяца (апрель–июнь) эта связь ($r = 0,95^*$) становилась более явной. Выход ядра (в % от массы семени) не зависел от погодных условий.

Семенная продуктивность. Три показателя семенной продуктивности в расчете на 1 дерево (число полноценных семян, масса полноценных семян и масса ядер) функционально связаны с погодичной изменчивостью ($r = 1,0^*$) потому, что все они определялись в основном числом шишек. Признаки, характеризующие семенную продуктивность, складывались под влиянием рассмотренных выше метеорологических факторов.

Таким образом, успех половой репродукции кедрового сибирского определяется почти исключительно в год опыления шишек. От погодных условий в год их заложения и созревания почти ничего не зависит. В год опыления для развития шишек благоприятны: позднее начало вегетационного периода, снижающее вероятность сильных заморозков после накопления большой суммы эффективных температур, и ранняя осень без возвратов тепла в сентябре. Приведем еще один факт, наглядно иллюстрирующий данный вывод. В период наших многолетних наблюдений сумма температур выше $5\text{ }^\circ\text{C}$ обычно варьировала от 1400 до 1550 $^\circ\text{C}$. Лишь в 1992 и 1996 гг. она была ниже 1300 $^\circ\text{C}$. Именно после этих лет сформировались идеальные в количественном и качественном отношении генерации шишек (1993 и 1997 гг.).

Цикл развития одной генерации шишек у кедрового сибирского продолжается ровно 2 года, но относится к трем вегетационным периодам. Рассмотрим их подробно.

Год заложения шишек. Т.П. Некрасова [9] по результатам своих многолетних исследований семеношения сибирских хвойных видов сделала следующий вывод: заложение шишек в погодичной динамике положительно с тем климатическим фактором, который лимитирует жизнедеятельность вида в данном конкретном регионе. Этот вывод был сделан применительно к погодным условиям в период роста побегов, т. к. именно на данном этапе создается физиологическая база для половой репродукции. Полученные нами результаты согласуются с [9]. Вполне естественно, что для нашего объекта, расположенного на крайнем юге лесной зоны, заложение шишек определялось в основном условиями увлажнения в последние 2 года, а температура воздуха на этот процесс не влияла.

В научной литературе нередко встречается другая точка зрения, согласно которой даже в обделенных влагой экотопах заложение шишек увеличивается в теплое и сухое лето [19, 36, 40], что объясняется ростом содержания углеводов в почках и побегах [32]. Однако критическое снижение суммы осадков, особенно острая почвенная засуха, уменьшает заложение шишек [2].

В некоторых публикациях утверждается, что ключевую роль в заложении шишек играют условия предшествующего года или даже нескольких предшествующих лет. Считается, что именно в это время создаются запасы питательных веществ. Обосновывающие данное положение результаты получены в разных климатических районах для многих лесных древесных растений [14, 26, 36, 40]. Однако еще больше информации о решающей зависимости числа шишек от погоды непосредственно в период заложения шишек

(месяц или даже декаду). Эти факты также относятся к объектам в разнообразных климатических и почвенных условиях [20, 21, 29].

Как бы ни объяснялись имеющиеся противоречия, для нашего объекта, кедр сибирского, это не особенно актуально. Заложение шишек у него очень стабильно из года в год, поэтому не является главным фактором динамики семеношения [9].

Год опыления шишек. У сосны микростробилы к периоду зимнего покоя достигают стадии археспория, а шишки лишь начинают дифференциацию (2-хвойные сосны) или вовсе зимуют в недифференцированном виде (5-хвойные сосны) [31]. Последнее характерно и для кедр сибирского [9]. Весенняя дифференциация репродуктивных структур рассматривается как очень важный этап их развития, на котором они крайне уязвимы [10]. Важность этапа обусловлена тем, что он подготавливает опыление, а уязвимость – резкими колебаниями температуры, происходящими в этот период. Наиболее опасными считаются заморозки во время 2-го деления мейоза и позже [23, 24].

Кедр «цветет» последним из сибирских хвойных, соответственно, и все остальные этапы весеннего развития репродуктивных структур сдвинуты у него на более поздние сроки [10]. Однако заморозки опасны и для этого дерева. Так, в горах Южной Сибири многократно описаны случаи серьезного повреждения и даже уничтожения мужских и женских репродуктивных органов морозом на этапах «бутонизации» и «цветения» [3, 8]. На Западном Саяне отрицательные температуры воздуха во время 2-го деления мейоза прерывали его нормальный ход, от чего снижались количество пыльцы и ее функциональная полноценность, а в конечном счете – число полных семян [12].

Наравнине, в том числе на юге Томской области, как считала Т.П. Некрасова [9], поздние заморозки не становятся важным негативным фактором развития репродуктивных структур в год опыления. По результатам наших исследований, такие заморозки были не просто важным, а главным фактором, определяющим судьбу каждой генерации шишек. При этом речь идет не о поздних слабых, а об относительно ранних сильных (от -3 до $-4,5$ °C) заморозках, происходящих во время первого деления мейоза или даже раньше.

Почему это явление не было обнаружено раньше? Видимо, потому что скрытые в почках микростробилы и шишки считались надежно защищенными. Для этого есть некоторые основания. Уже зимой в покоящемся состоянии цветочные почки на $10...20$ °C чувствительнее к морозу, чем вегетативные [32]. Однако в период цветения мороз губителен далеко не всегда [1]. Значит, главный фактор – устойчивость к морозу самих репродуктивных структур, а не их защита почечными чешуями или ее отсутствие. В годы с длительными ранневесенними оттепелями провоцируются ростовые и формообразовательные процессы. Клетки и ткани теряют устойчивость к низким температурам, а при возобновлении морозов повреждаются ими. Возможности почечных чешуй в части защиты от мороза ограничены. Вероятно, они могут защитить шишки только от слабых (до -3 °C) заморозков. Против отрицательной температуры ниже этого порога они бессильны. Вряд ли эта закономерность окажется универсальной, однако ее целесообразность не вызывает ни малейшего сомнения.

Нерегулярное семеношение – важный адаптивный признак, особенно для видов, чьи семена являются кормом для лесных животных: в неурожайные годы численность потребителей сильно снижается, поэтому в следующий

за ними урожайный год обеспечивается массовое возобновление вида [25, 28, 38]. Виды сильно различаются в отношении того, на каком этапе развития репродуктивных структур формируется эта нерегулярность: при заложении или в ходе дальнейшего развития [32, 33]. Кедр сибирский, несомненно, относится к последнему типу: у него заложение шишек в значительном количестве происходит ежегодно [5]. Это эффективная стратегия: на формирование зачатков шишек расходуется совсем мало ресурсов. Нерегулярность семеношения должна быть обеспечена гибелью этих зачатков, например в 2 года из 3-х или в 3 года из 4-х. Максимально ранняя их гибель способствует максимальной экономии пищевых ресурсов. Начало дифференциации – оптимальное время для уничтожения шишек, их разрушение заморозками – оптимальный механизм. Эта модель, по-видимому, реализуется через оптимизацию генотипического состава популяции естественным отбором: большинство в ней составляют особи, репродуктивные структуры которых в среднем 1 раз за 3-4 года не разрушаются весенними заморозками. Это, скорее всего, происходит потому, что в остальные 2-3 года уязвимые для мороза этапы развития шишек начинаются при такой сумме эффективных температур, когда очень велика вероятность сильных заморозков.

Отрицательная (ниже -3 °C) температура в период дифференциации репродуктивных структур и мейоза полностью разрушала их только на определенном, относительно позднем этапе их развития: при накоплении такой суммы температур ($150...180$ °C), при которой в микроспорангиях начинается обособление микроспороцитов и активная дифференциация женской шишки [9, 10]. Такая же температура на относительно раннем этапе (формирование археспория и заложение первых кроющих чешуй, сумма тепла $100...150$ °C) полностью уничтожала лишь часть шишек, а у выживших значительно сокращала число фертильных чешуй. Сильный заморозок на самых ранних этапах весеннего развития репродуктивных структур (при сумме температур $50...100$ °C) предопределял повышенный уровень абортности семяпочек в течение текущего и следующего вегетационного периодов. Таким образом, наблюдалось парадоксальное явление: чем позже случался заморозок, тем раньше был виден его эффект. Больше всего поражает такой факт: на развитие семяпочек негативно влияют даже те сильные заморозки, которые происходили за 2-3 недели до заложения. При этом сокращается не только доля недоразвитых семян, но и пустых семян и семян с недоразвитым эндоспермом, а это признаки, которые формируются после оплодотворения! Возможно, главным фактором здесь является количество и качество пыльцы. При сумме эффективных температур $50...100$ °C в микростробилах кедр сибирского происходит дифференциация микроспорангиев [10]. Скорее всего, сильный заморозок существенно нарушает этот процесс.

Дефицит пыльцы и ее низкое качество значительно снижают продукцию семян [10, 12, 15, 27, 35]. У сосен неопыленные семяпочки рано или поздно прекращают развитие, неопыленные шишки рано или поздно опадают [10, 12]. Однако все это происходит не сразу, а в течение, как минимум, месяца [13]. У кедр сибирского этот процесс часто завершается только к осени, потому что без пыльцы может начаться даже развитие женского гаметофита [12].

В природных условиях чаще наблюдается не полное отсутствие пыльцы, а лишь ее ощутимый дефицит [10]. Если часть семяпочек опылена, то шишка продолжает свое развитие. В этом случае неопыленные семяпочки дегенерируют медленно: в течение нескольких месяцев [13]. В репродуктивной системе процессы и явления тесно взаимосвязаны. Если в какой-то год пыльцы мало,

то она, как правило, низкого качества: плохо и медленно прорастает, образует слабую или аномальную пыльцевую трубку, формируются ущербные спермии [10]. Поэтому заморозки в период дифференциации микроспорангиев и мейоза в микроспороцитах определяют потери семян на разных этапах их развития.

Погода летом и осенью в год опыления ни по нашим данным, ни по данным других исследователей существенно не влияет на развитие шишек у сосен. Осень в год опыления обычно также не рассматривается как важный период. Негативное влияние на развитие шишек повышенной температуры воздуха в первой половине осени установлено лишь в настоящей работе. Как теплый сентябрь мешает нормальному развитию шишек? Здесь уместно провести аналогию с вегетативными почками. Почка возобновления, которая предназначена для весеннего побегообразования, довольно часто начинают растягиваться в конце лета или в начале осени. Обычно они не успевают одревеснеть до мороза, погибают полностью или сильно повреждаются. Так, С.П. Ефремов [7] установил, что у молодых деревьев сосны обыкновенной на юге лесной зоны в одни годы это характерно для 5...7 %, в другие – для 93...95 % побегов. Похожее явление – выход 1-летних шишек из состояния покоя во 2-й половине вегетационного периода – обнаружено у кедра сибирского на Западном Саяне [8]. Если аномальным разрастанием охвачена фертильная зона шишки, то семяпочки в ней никогда не развиваются в нормальные семена. Аномальное разрастание 1-летних шишек встречается нечасто и показывает принцип воздействия аномальных погодных условий на 1-летние шишки, находящиеся в состоянии покоя. Скорее всего, теплый сентябрь провоцирует выход некоторых семян из этого состояния; впоследствии они повреждаются осенними заморозками или зимними морозами.

Таким образом, у кедра сибирского на юге лесной зоны в год опыления отмечается два критических периода в развитии шишек: в начале весны определяется, будет ли в следующем году урожай шишек, в начале осени – будет он средним или высоким.

Год созревания шишек. Считается, что у кедра сибирского 2-летние (созревающие) шишки мало подвержены преждевременному опаданию, во всяком случае, гораздо меньше, чем 1-летние. По нашим наблюдениям, поздние весенние заморозки никак не влияли на перезимовавшие шишки. Видимо, естественный отбор сдвинул важные процессы в них на более поздние сроки, когда сильных заморозков уже не бывает.

Потери семян в год созревания шишек происходят, но существенной величины достигают лишь тогда, когда неблагоприятным для развития данной генерации был предыдущий год. От погодных условий в год созревания зависит лишь один важный признак – масса семени: она повышается с увеличением суммы осадков во время роста семян и в подготовительный период. В научной литературе нам не удалось найти сообщений о подобной закономерности, однако ее наличие представляется нам вполне естественным.

Заключение

Жизнедеятельность дерева состоит из двух одинаково важных «половинок»: вегетативной и генеративной. Хорошее состояние вегетативной сферы

нужно дереву всегда. Поэтому вегетативный рост происходит ежегодно, а его зависимость от погодных условий проста и универсальна. Ежегодная стабильная продукция семян не приносит пользы большинству лесных древесных растений. Напротив, они «заинтересованы» в более или менее выраженной нерегулярности семеношения. Каждый род, нередко вид, а возможно даже и популяция, решают эту проблему по-своему. Сильно различается соотношение внутренних и внешних факторов, вторые в разное время влияют на продукцию семян различными способами и на разных этапах репродуктивного цикла.

У объекта исследования, кедр сибирского на юге лесной зоны в Западной Сибири, главным фактором погодичной динамики семеношения является наличие или отсутствие сильных заморозков в период дифференциации шишек и первого деления мейоза. В «жестком» варианте низкие температуры просто уничтожают репродуктивные структуры, в относительно «мягком» – определяют повышенный уровень разного рода потерь на всем протяжении данного репродуктивного цикла. Это явление для сосен впервые описано в настоящей работе. Ранее опасными считались лишь относительно поздние заморозки в период второго деления мейоза и собственно в период опыления.

Значительное влияние на продукцию семян оказывают также погодные условия осенью в год опыления: с увеличением средней температуры воздуха в сентябре продукция семян и их качество в следующем году существенно снижаются. Это также новый для науки факт. В данном случае предполагается, что тепло провоцирует выход из состояния покоя, последующий мороз повреждает «беспокойные» репродуктивные структуры.

Такая связь динамики семенной продукции с погодными условиями представляется логичной и целесообразной: в умеренном поясе мороз – главный климатический фактор, к которому древесные растения вынуждены адаптироваться, в том числе использовать его «во благо». Однако это не означает, что установленная нами закономерность универсальна для всего ареала кедр сибирского, не говоря уже о других видах лесных деревьев.

Серьезным вызовом для репродуктивной системы лесных древесных растений умеренного пояса являются изменения климата. В настоящей работе приведены результаты лишь первого этапа наблюдений, который относится к самому началу современного климатического цикла. Наблюдения в основном завершены, их результаты обрабатываются, поэтому есть основания надеяться, что в следующих публикациях у нас появится возможность рассмотреть и эту проблему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барабин А.И. Сравнительный анализ урожая семян ели семенного и малоурожайного года в учебно-опытном лесхозе АЛТИ // Изв. вузов. Лесн. журн. 1969. № 3. С. 137–138. [Barabin A.I. Comparative Analysis of Spruce Seed Harvest in Mast and Low-Yield Years in the Educational and Experimental Forestry of the Arkhangelsk Forestry Engineering Institute. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1969, no. 3, pp. 137–138]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1969.pdf>

2. Булыгин Н.Е. Влияние засух 1972 и 1973 гг. на цветение и плодоношение древесных растений на Северо-Западе РСФСР // Лесное хозяйство, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность. Л.: Лесн. пром-сть, 1975. Вып. 3. С. 11–13. [Bulygin N.E. Influence of Droughts in 1972 and 1973 on Flowering and Fruiting of Woody

Plants in the North-West of the Russian Federation. *Forestry, Woodworking, Pulp and Paper Industry*. Leningrad, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975, iss. 3, pp. 11–13].

3. Воробьев В.Н. Биологические основы комплексного использования кедровых лесов. Новосибирск: Наука, 1983. 253 с. [Vorob'yev V.N. *Biological Bases of Complex Use of Cedar Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 253 p.].

4. Воробьев В.Н., Воробьева Н.А., Горошкевич С.Н. Рост и пол кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1989. 167 с. [Vorob'yev V.N., Vorob'yeva N.A., Goroshkevich S.N. *Growth and Sex in Siberian Stone Pine*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 167 p.].

5. Горошкевич С.Н. Динамика роста и плодоношения кедра сибирского. Уровень и характер изменчивости признаков // Экология. 2008. № 3. С. 181–188. [Goroshkevich S.N. Dynamics of Growth and Seed Production in the Siberian Stone Pine: The Level and Pattern of Variation in Characters. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2008, no. 3, pp. 181–188]. DOI: [10.1134/S106741360803003X](https://doi.org/10.1134/S106741360803003X)

6. Горошкевич С.Н. Динамика роста и плодоношения кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour): цикличность или ациклические колебания? // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2017. № 38. С. 104–121. [Goroshkevich S.N. Dynamics of Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour) Growth and Seed Production: Cyclicity or Acyclic Oscillation? *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2017, no. 38, pp. 104–121]. DOI: [10.17223/19988591/38/6](https://doi.org/10.17223/19988591/38/6)

7. Ефремов С.П. Пионерные древостои осушенных болот. Новосибирск: Наука, 1987. 248 с. [Efremov S.P. *Pioneer Stands of Drained Swamps*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 248 p.].

8. Ирошников А.И. Полиморфизм популяций кедра сибирского // Изменчивость древесных растений Сибири. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1974. С. 77–103. [Iroshnikov A.I. Polymorphism in Populations of Siberian Stone Pine. *Variability of Siberian Woody Plants*. Krasnoyarsk, ILiD SO AN Publ., 1974, pp. 77–103].

9. Некрасова Т.П. Биологические основы семеношения кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1972. 272 с. [Nekrasova T.P. *Biological Bases of Siberian Stone Pine Seeding*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. 272 p.].

10. Некрасова Т.П. Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 86 с. [Nekrasova T.P. *Pollen and Pollen Regime of Siberian Conifers*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 86 p.].

11. Несветайло В.Д. Многолетняя динамика репродуктивной деятельности и радиального прироста кедра сибирского в припоселковом кедровнике подзоны южной тайги // Экология. 1987. № 6. С. 19–25. [Nesvetaylo V.D. Long-Term Dynamics of Reproductive Activity and Radial Growth of Siberian Stone Pine in the Near-Settlement Cedar Forest of the Southern Taiga Subzone. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 1987, no. 6, pp. 19–25].

12. Третьякова И.Н. Эмбриология хвойных. Физиологические аспекты. Новосибирск: Наука, 1990. 157 с. [Tretyakova I.N. *Embryology of Conifers. Physiological Aspects*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 157 p.].

13. Хромова Л.В. Эмбриологические процессы в неопыленных семязпочках сосны и аномалии при ксеногамии // Лесоведение. 1985. № 2. С. 47–52. [Khromova L.V. Embryological Processes in Unpollinated Pine Seedbuds and Anomalies in Xenogamy. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1985, no. 2, pp. 47–52].

14. Bisi F., von Hardenberg J., Bertolino S., Wauters L.A., Imperio S., Preatoni D.G., Provenzale A., Mazzamuto M.V., Martinoli A. Current and Future Conifer Seed Production in the Alps: Testing Weather Factors as Cues Behind Masting. *European Journal of Forest Research*, vol. 135, iss. 4, pp. 743–754. DOI: [10.1007/s10342-016-0969-4](https://doi.org/10.1007/s10342-016-0969-4)

15. Bogdziewicz M., Szymkowiak J., Kasprzyk I., Grewling Ł., Borowski Z., Borycka K., Kantorowicz W., Myszkowska D., Piotrowicz K., Ziemiński M., Pesendorfer M.B.

Masting in Wind-Pollinated Trees: System-Specific Roles of Weather and Pollination Dynamics in Driving Seed Production. *Ecology*, 2017, vol. 98, iss. 10, pp. 2615–2625. DOI: [10.1002/ecy.1951](https://doi.org/10.1002/ecy.1951)

16. Buechling A., Martin P.H., Canham C.D., Shepperd W.D., Battaglia M.A. Climate Drivers of Seed Production in *Picea engelmannii* and Response to Warming Temperatures in the Southern Rocky Mountains. *Journal of Ecology*, 2016, vol. 104, iss. 4, pp. 1051–1062. DOI: [10.1111/1365-2745.12572](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12572)

17. Burns K.C. Masting in a Temperate Tree: Evidence for Environmental Prediction? *Austral Ecology*, 2012, vol. 37, iss. 2, pp. 175–182. DOI: [10.1111/j.1442-9993.2011.02260.x](https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02260.x)

18. Carevic F.S., Fernández M., Alejano R., Vázquez-Piqué J., Tapias R., Corral E., Domingo J. Plant Water Relations and Edaphoclimatic Conditions Affecting Acorn Production in a Holm Oak (*Quercus ilex* L. ssp. *ballota*) Open Woodland. *Agroforestry Systems*, 2010, vol. 78, iss. 3, pp. 299–308. DOI: [10.1007/s10457-009-9245-7](https://doi.org/10.1007/s10457-009-9245-7)

19. Crone E.E., Rapp J.M. Resource Depletion, Pollen Coupling, and the Ecology of Mast Seeding. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2014, vol. 1322, iss. 1, pp. 21–34. DOI: [10.1111/nyas.12465](https://doi.org/10.1111/nyas.12465)

20. Daubenmire R. A Seven-Year Study of Cone Production as Related to Xylem Layers in *Pinus ponderosa*. *American Midland Naturalist*, 1960, vol. 64, no. 1, pp. 187–193. DOI: [10.2307/2422901](https://doi.org/10.2307/2422901)

21. Fober H. Relation between Climatic Factors and Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Cone Crops in Poland. *Arboretum Kórnickie*, 1976, vol. 21, pp. 367–374.

22. Fowells H.A., Schubert G. *Seed Crops of Forest Trees in the Pine Region of California*. Technical Bulletin No. 1150. Washington D.C., U.S. Department of Agriculture, 1956. 48 p.

23. Houle G. Mast Seeding in *Abies balsamea*, *Acer saccharum* and *Betula alleghaniensis* in an Old Growth, Cold Temperate Forest of North-Eastern North America. *Journal of Ecology*, 1999, vol. 87, iss. 3, pp. 413–422. DOI: [10.1046/j.1365-2745.1999.00352.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00352.x)

24. Juday G.P., Barber V. A 200-Year Perspective of Climate Variability and the Response of White Spruce in Interior Alaska. *Climate Variability and Ecosystem Response at Long-Term Ecological Research Sites*. Ed. by D. Greenland, D.G. Goodin, R.C. Smith. New York, Oxford University Press, 2003, pp. 226–250. DOI: [10.1093/oso/9780195150599.003.0024](https://doi.org/10.1093/oso/9780195150599.003.0024)

25. Kelly D. The Evolutionary Ecology of Mast Seeding. *Trends in Ecology and Evolution*, 1994, vol. 9, iss. 12, pp. 465–470. DOI: [10.1016/0169-5347\(94\)90310-7](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90310-7)

26. Kelly D., Geldenhuis A., James A., Holland E.P., Plank M.J., Brockie R.E. et al. Of Mast and Mean: Differential-Temperature Cue Makes Mast Seeding Insensitive to Climate Change. *Ecology Letters*, 2013, vol. 16, iss. 1, pp. 90–98. DOI: [10.1111/ele.12020](https://doi.org/10.1111/ele.12020)

27. Kelly D., Hart D.E., Allen R.B. Evaluating the Wind Pollination Benefits of Mast Seeding. *Ecology*, 2001, vol. 82, iss. 1, pp. 117–126. DOI: [10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0117:et-wpbo\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0117:et-wpbo]2.0.co;2)

28. Kelly D., Sork V.L. Mast Seeding in Perennial Plants: Why, How, Where? *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, vol. 33, pp. 427–447. DOI: [10.1146/annurev.ecolsys.33.020602.095433](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.020602.095433)

29. Lindgren K., Ekberg I., Eriksson G. External Factors Influencing Female Flowering in *Picea abies* (L.) Karst. *Studia Forestalia Suecica*, 1977, no. 142. 53 p.

30. Nussbaumer A., Waldner P., Aputin V., Aytar F., Benham S., Bussotti F. et al. Impact of Weather Cues and Resource Dynamics on Mast Occurrence in the Main Forest Tree Species in Europe. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 429, pp. 336–350. DOI: [10.1016/j.foreco.2018.07.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.011)

31. Owens J.N., Bruns D. Western White Pine (*Pinus monticola* Dougl.) Reproduction: I. Gametophyte Development. *Sexual Plant Reproduction*, 2000, vol. 13, iss. 2, pp. 61–74. DOI: [10.1007/s004970000042](https://doi.org/10.1007/s004970000042)

32. Pallardy S.G. *Physiology of Woody Plants*. San Diego, Academic, 2007. 464 p.

33. Pearse I.S., Koenig W.D., Kelly D. Mechanisms of Mast Seeding: Resources, Weather, Cues, and Selection. *New Phytologist*, 2016, vol. 212, iss. 3, pp. 546–562. DOI: [10.1111/nph.14114](https://doi.org/10.1111/nph.14114)

34. Pérez-Ramos I.M., Aponte C., García L.V., Padilla-Díaz C.M., Marañón T. Why Is Seed Production So Variable among Individuals? A Ten-Year Study with Oaks Reveals the Importance of Soil Environment. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9(12), art. e115371. DOI: [10.1371/journal.pone.0115371](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115371)
35. Rapp J.M., McIntire E.J.B., Crone E.E. Sex Allocation, Pollen Limitation and Masting in Whitebark Pine. *Journal of Ecology*, 2013, vol. 101, iss. 5, pp. 1345–1352. DOI: [10.1111/1365-2745.12115](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12115)
36. Roland C.A., Schmidt J.H., Johnstone J.F. Climate Sensitivity of Reproduction in a Mast-Seeding Boreal Conifer across Its Distributional Range from Lowland to Treeline Forests. *Oecologia*, 2014, vol. 174, iss. 3, pp. 665–677. DOI: [10.1007/s00442-013-2821-6](https://doi.org/10.1007/s00442-013-2821-6)
37. Schweingruber F.H. *Tree Rings and Environment*. Berne, Paul Haupt, 1996. 609 p.
38. Silvertown J.W. The Evolutionary Ecology of Mast Seeding in Trees. *Biological Journal of the Linnean Society*, 1980, vol. 14, iss. 2, pp. 235–250. DOI: [10.1111/j.1095-8312.1980.tb00107.x](https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1980.tb00107.x)
39. Speer J.H. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tucson, University of Arizona Press, 2010. 333 p.
40. Zamorano J.G., Hokkanen T., Lehtikoinen A. Climate-Driven Synchrony in Seed Production of Masting Deciduous and Conifer Tree Species. *Journal of Plant Ecology*, 2018, vol. 11, iss. 2, pp. 180–188. DOI: [10.1093/jpe/rtw117](https://doi.org/10.1093/jpe/rtw117)

WEATHER CONDITIONALITY OF SIBERIAN STONE PINE (*Pinus sibirica* DU TOUR) SEEDING

Sergei N. Goroshkevich, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [I-5084-2018](https://orcid.org/0000-0003-0805-8656),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0805-8656>

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademicheskiiy, 10/3, Tomsk, 634055, Russian Federation; e-mail: pearldiver@yandex.ru

Abstract. The dynamics of Siberian stone pine sexual reproduction in the South-Eastern part of the West Siberian Plain was studied by 13-year stationary observations. The stand age was 160–180 years, the average tree height was 22 m, and the average diameter of the trunk at breast height was 53 cm. On average, 50–60 trees were analyzed annually (in different years from 25 to 100). Cones were counted and samples were collected annually from August 10 to August 20. The researcher (usually the author of this paper) climbed each tree, knocked down the cones with operating tools (a bat and a rod), and then their number was counted on the ground. A sample of 10–15 cones was taken from each tree. Afterwards, a complete morphological analysis was performed: the number of sterile and fertile scales, and underdeveloped and developed seeds were counted. Developed seeds were analyzed by the X-ray method. To determine the weight, only perfectly full seeds selected by the X-ray pattern were used. Information on weather conditions was used according to data from the Tomsk station of Roshydromet. The main factor in the cone initiation was the amount of precipitation during 2 years before the start of this process: with an increase in the amount of precipitation, the number of cones increases. However, the final seed productivity depends to a greater extent not on the number of initiated cones, but on the success of their further development. The most important stage in the cone development was spring in the year of pollination and the main negative factor was late frosts. The degree of their negative impact is determined by the sum of the effective (above 5 °C) mean daily temperatures at which the return of frost with temperature from –3 to –4 °C occurred. Complete abortion of cones occurred only when the sum of effective temperatures was 150–180 °C. The same frost at the accumulated

temperature sum of 100–150 °C killed a significant part of the cones, and the rest strongly disrupted the development. When the sum of accumulated temperature was about 50 °C, a strong frost significantly increased the loss of seedbuds at all stages of their development, thereby reducing the number of full seeds. The average temperature of September in the pollination year was an important factor in seed production. The loss of seedbuds increased significantly with its increase. The only important trait that is formed in the year of cone maturity is the weight of full seeds: it increases with the amount of precipitation from April to June of the current year.

For citation: Goroshkevich S.N. Weather Conditionality of Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour) Seeding. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 56–69. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-56-69

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 18-16-00058.

Keywords: Siberian stone pine, seeding dynamics, weather conditions, amount of precipitation, spring frosts.

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

Поступила 19.02.20 / Received on February 19, 2020

УДК 577.35:574.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-70-85

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ПО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТКАНЕЙ СТВОЛА

В.Г. Суховольский¹, *д-р биол. наук, проф.*; *ResearcherID: K-1740-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-2290>

В.И. Воронин², *д-р биол. наук*; *ResearcherID: N-8292-2013*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1467-9865>

В.А. Осколков², *канд. биол. наук*; *ResearcherID: K-1961-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4339-1094>

А.В. Ковалев³, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: K-1756-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-768X>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: soukhovolsky@yandex.ru

²Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, ул. Лермонтова, д. 132, г. Иркутск, Россия, 664033; e-mail: bioin@sifibr.irk.ru, vosk@sifibr.isk.ru

³Красноярский научный центр СО РАН, Академгородок, д. 50, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: sunhi.prime@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены возможности использования методов диэлектрической спектроскопии для оценки состояния деревьев. Диэлектрические показатели характеризуют клеточные мембраны и проводимость растительных тканей. Для измерения диэлектрических показателей использован диэлектрический импульсный Фурье-спектрометр оригинальной конструкции, подключенный к портативному компьютеру, с помощью которого осуществляется управление и питание прибора. Его конструкция позволяет экспрессно (за время около 1 с) получить информацию о диэлектрических характеристиках тканей ствола дерева в диапазоне частот от 1 до 100 кГц и в полевых условиях обработать, визуализировать и сохранить результаты измерений на компьютере. Оценки состояния деревьев, полученные с помощью диэлектрического импульсного Фурье-спектрометра, сопоставлялись с визуальными характеристиками дерева и данными о его радиальном приросте. Показано, что существуют различия в значениях диэлектрических характеристик у деревьев разных категорий состояния и с разными величинами радиального прироста. Данные диэлектрической спектроскопии в отличие от субъективных качественных визуальных показателей состояния дерева носят количественный объективный характер. Их можно получить значительно быстрее и с меньшими трудозатратами по сравнению с оценками характеристик дерева по радиальному приросту. Предложенный метод использовался для оценки состояния кедр сибирского (*Pinus sibirica*), пихты сибирской (*Abies sibirica*) и ели обыкновенной (*Picea obovata*) в лесных насаждениях Прибайкалья. Исследования проводились как в контрольных (неповрежденных) насаждениях, так и в пораженных бактериальной водяжкой. Показано, что предложенный метод может быть применен для экспресс-оценки состояния деревьев и уровня их повреждений.

Для цитирования: Суховольский В.Г., Воронин В.И., Осколков В.А., Ковалев А.В. Экспресс-оценка физиологического состояния древесных растений по диэлектрическим характеристикам тканей ствола // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 70–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-70-85

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-05074офи_м).

Ключевые слова: состояние дерева, визуальная оценка, радиальный прирост, диэлектрические характеристики, экспресс-измерения.

Введение

Существуют различные методы определения состояния дерева: визуальная классификация по категориям состояния, оценка по характеристикам радиального прироста, измерения физиологических характеристик дерева. Однако эти методы обладают существенными недостатками: визуальные классификации во многом субъективны и дают лишь качественную оценку состояния дерева, использование характеристик радиального прироста трудоемко и неэффективно с точки зрения затрат времени, то же относится к физиологическим показателям. В связи с этим можно говорить о существовании необходимости разработки методов экспрессной количественной оценки состояния деревьев в лесу.

В настоящей работе для экспресс-оценки состояния деревьев использовались методы диэлектрической спектроскопии [9, 12, 13, 32–38, 41–44], на основе которых показатели состояния древесных растений сопоставлялись с визуальными оценками состояния деревьев и величинами их радиального прироста.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в зоне Хамар-Дабанской гольцово-горно-таежной провинции Южно-сибирской горно-таежной области и Байкальской озерно-котловинной провинции Байкало-Джугджурской гольцово-горно-таежной области [1]. Эдификаторами лесов в районе выступают кедр сибирский (*Pinus sibirica*), пихта сибирская (*Abies sibirica*) и ель сибирская (*Picea obovata*) при участии сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*).

Неблагополучное состояние темнохвойных лесов Прибайкалья (наблюдается уже 40 лет [2–4, 14, 21]) связывали с воздействием поллютантов, массовыми грибными эпифитотиями и размножением насекомых-дендрофагов [21]. В последние годы ситуация еще более усложнилась в связи с распространением в районах Прибайкалья больших очагов бактериозов хвойных [2, 4]. Бактериальная водянка хвойных пород, поражающая в том числе и кедр, представляет собой ранее несвойственное для деревьев Сибири заболевание. Впервые гибель лесов, предположительно от этой болезни, отмечена в 2012 г. на стыке трех районов, в Усольском, Слюдянском и Шелеховском лесничествах Иркутской области, относящихся к Байкальской природной территории. Симптомы бактериальной водянки хвойных – ослабление и усыхание деревьев; поперечные и продольные трещины в коре и активное смолотечение из них; наличие на поперечном срезе древесины ствола «мокрого ядра», а у сильно ослабленных и недавно усохших деревьев – характерного «темного водослоя». Очень часто первым внешне заметным признаком болезни дерева является изменение окраски хвои. Вначале она желтеет, обычно с кончиков, а затем довольно быстро приобретает оранжево- или розовато-красную окраску, засыхает, но сразу, как правило, не осыпается. Это может произойти в любой части

кроны – на вершине, сбоку, снизу, в середине, нередко на отдельной ветви и даже на отдельных мутовках, а в некоторых случаях только на концах ветвей, но иногда и по всей кроне сразу.

Считается, что фактором, приводящим к заражению насаждений инфекцией, стало их общее ослабление, вызванное добычей кедрового ореха методом околота. Обработанные таким способом кедровые деревья находятся в угнетенном состоянии, на их стволах образуются незаживающие язвы, через которые проникает патоген. Для деревьев, подвергавшихся такому воздействию в течение многих лет, характерны повреждения практически по всему стволу.

Для сравнения состояния деревьев, поврежденных водянкой, и деревьев в неповрежденном древостое исследования проводили на 3 пробных площадях (ПП). Контрольная ПП Выдринная ($N51^{\circ}28'16,1''$, $E104^{\circ}51'21,6''$) представляет собой кедрово-березовый с породным составом 10К+П,Б, средний диаметр кедрового дерева в насаждении – 27,0 см. Поврежденное насаждение на ПП Бабушкин ($N51^{\circ}29'53,1''$, $E105^{\circ}59'09,5''$) – кедрово-березовый с породным составом 9К1П, средний диаметр кедрового дерева в насаждении – 20,5 см. Поврежденное насаждение на ПП Култук ($N51^{\circ}46'06,6''$, $E103^{\circ}37'16,6''$) – смешанное лиственнично-кедрово-пихтовое насаждение багульниково-зеленомошного типа с преобладанием в составе древостоя лиственницы, породный состав – 9Л1К+Б, в подросте – кедр, средний диаметр кедрового дерева в насаждении – 16,5 см.

Диэлектрические характеристики тканей стволов деревьев. Диэлектрические параметры тканей (сопротивление и емкость в широком диапазоне частот) позволяют характеризовать емкость мембран клеток и проводимость тканей [8, 25, 33, 41].

Для описания диэлектрических свойств биологических тканей используется эквивалентная электрическая схема ткани, приведенная на рис. 1.

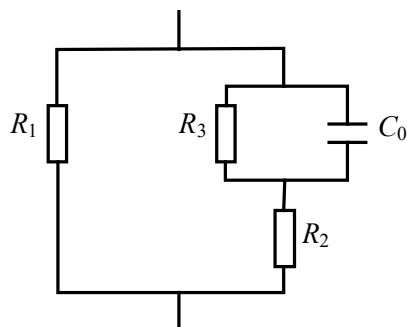


Рис. 1. Микроскопические электрические показатели эквивалентной электрической схемы ткани: R_1 – сопротивление межклеточников; R_2 – сопротивление цитоплазмы; R_3 – сопротивление мембран; C_0 – емкость мембран

Fig. 1. Equivalent electrical scheme of biological tissue. The microscopic electrical indicators: R_1 – intercellular resistance; R_2 – cytoplasm resistance; R_3 – membrane resistance; C_0 – membrane capacity

Как следует из рис. 1., при прохождении электрического тока его часть течет через межклеточную среду, которую можно представлять в виде некоторого сопротивления R_1 (или проводимости $G_1 = 1/R_1$). Часть тока течет через мембраны клеток с сопротивлением R_3 (или проводимостью $G_3 = 1/R_3$) и емкостью C_0 , а далее – через цитоплазму, имеющую сопротивление R_2 (или проводимость $G_2 = 1/R_2$).

По эквивалентной схеме можно из микроскопических электрических показателей рассчитать измеряемые в эксперименте проводимость G и емкость C ткани:

$$G(\omega) = G_1 + \frac{G_2(G_3G_2 + G_3^2 + \omega^2C_0^2)}{(G_2 + G_3)^2 + \omega^2C_0^2}; \quad (1)$$

$$C(\omega) = \frac{C_0G_2^2}{(G_2 + G_3)^2 + \omega^2C_0^2}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота пропускаемого тока.

Полный импеданс ткани запишем в следующем виде:

$$Z = \frac{1}{A} = \frac{1}{G(\omega) + i\omega C(\omega)}, \quad (3)$$

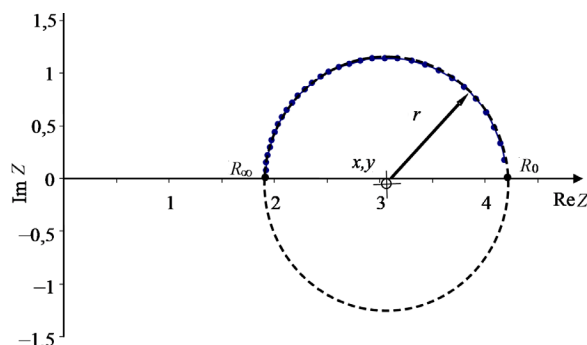
где $A = G(\omega) + i\omega C(\omega)$ – адмиттанс; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Зависимость электрических характеристик от частоты пропускаемого электрического тока характеризуется импеданс-годографами, представляющими собой кривые, описывающие связь омической и емкостной проводимости на различных частотах. Возможно построение импеданс-годографов в плоскостях полной $\{G, G''\}$ (где $G'' = \omega C$) и диэлектрической $\{C, C''\}$ (где $C'' = (G - G_0)/\omega$) проводимости. Точки пересечения импеданс-годографов с осями G и C дают в этом случае искомые характеристики C_0 и G_∞ .

Для однородного по своим электрическим характеристикам вещества кривая импеданс-годографа представляет полуокружность (диаграмму Дебая), построенную в плоскости вещественной $\text{Re}(\omega)$ и мнимой $\text{Im}(\omega)$ компонент импеданса (рис. 2).

Рис. 2. Кривая импеданс-годографа древесных тканей

Fig. 2. Impedance hodograph of woody tissues



Кривую импеданс-годографа можно описать, используя параметры r_0 и $2r$ (разность между R_0 и R_∞).

При патологических процессах в тканях растений характеристики емкостной и омической составляющих импеданса изменяются. В частности, уменьшается емкость клеточных мембран, изменяется проводимость тканей [24]. В связи с этим рассмотрена возможность использования этих показателей для оценки в полевых условиях состояния тканей древесных растений.

В работах, посвященных изучению диэлектрических характеристик тканей растений, измерялась лишь действительная составляющая импеданса тканей на одной-двух частотах или даже на постоянном токе [5–7, 10, 11, 15–18, 20, 22, 27, 30, 36, 38]. При подобных методах измерений невозможно иметь сколько-нибудь значительную информацию о диэлектрических свойствах тканей и сопоставлять экспериментальные данные с теоретическими представлениями о диэлектрических характеристиках веществ.

Полную характеристику диэлектрических свойств биологической ткани можно получать, проводя измерения действительной и мнимой составляющих импеданса в широком диапазоне частот (в области от 1,0 кГц до 0,5 мГц).

Для полной оценки импеданса обычно используют мосты переменного тока [24, 29, 31], однако эти методы достаточно медленны и трудоемки. Для быстрого измерения полных диэлектрических свойств биологического материала в широком диапазоне частот и автоматической обработки полученных данных нами использован метод диэлектрической Фурье-спектроскопии [26], который состоит в том, что на измеряемый объект (растительную ткань) подается достаточно «богатый» сигнал воздействия (например, сигнал, состоящий из большого числа синусоид) и регистрируется функция отклика объекта $A(t)$ в плоскости «амплитуда отклика – время». Далее, проводя Фурье-преобразование функции $A(t)$, можно получить спектральную функцию $A(\omega)$.

В качестве подходящего сигнала, возбуждающего систему, нами использовалась импульсная функция $X(t)$:

$$X(t) = \begin{cases} H, 0 \leq t \leq T, \\ 0, t > T, \end{cases}$$

где H – амплитуда возбуждающего сигнала; T – продолжительность возбуждения.

Использование методов Фурье-спектроскопии дает, во-первых, значительный выигрыш во времени, требуемом для измерения, т. к. фактически одновременно производятся измерения на всех частотах, и, во-вторых, позволяет добиться полной автоматизации измерений, т. к. значения функции отклика системы $A(t)$ могут задаваться специальной программой, загруженной в управляющий компьютер, с помощью которого будут производиться Фурье-преобразование и вычисляться параметры импеданс-годографов.

Для массовых экспрессных оценок состояния отдельных деревьев с автоматической обработкой результатов измерений и сохранением данных на компьютере нами разработан полевой прибор – диэлектрический спектрометр. Конструктивно он состоит из трех блоков, соединенных сигнальными проводами (рис. 3).

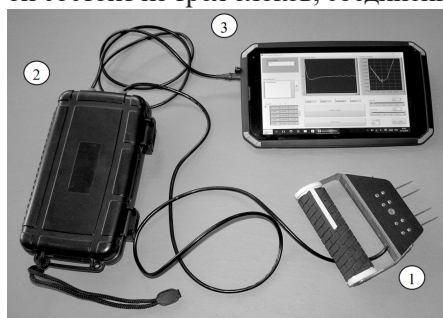


Рис. 3. Общий вид полевого диэлектрического спектрометра для измерения, обработки и хранения данных, визуализации результатов: 1 – измерительный щуп; 2 – плата спектрометра; 3 – планшетный персональный компьютер

Fig. 3. General view of a field dielectric spectrometer for measuring, processing and storing data, visualizing the results: 1 – measuring probe; 2 – spectrometer board; 3 – tablet personal computer

Схема измерения включает: генерацию узкого прямоугольного импульса; преобразование его в аналоговый вид; подачу электрического импульса на исследуемый образец; регистрацию ответного аналогового сигнала; перевод полученного сигнала в цифровой формат; Фурье-преобразование полученного сигнала; построение импеданс-годографа; расчет и сохранение параметров импеданс-годографа (рис. 4).

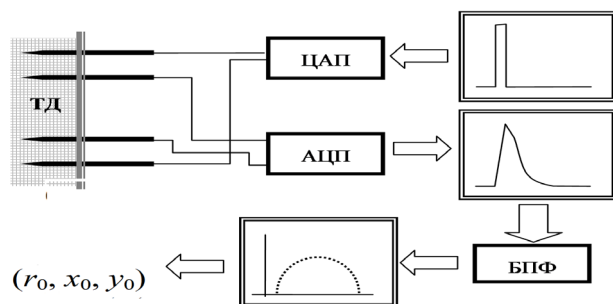


Рис. 4. Блок-схема оригинального автоматизированного диэлектрического импульсного Фурье-спектрометра для экспрессных измерений диэлектрических свойств древесных тканей, автоматической обработки и хранения данных: ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БПФ – быстрое преобразование Фурье

Fig. 4. Block diagram of the original automated pulsed Fourier transform dielectric spectrometer for express measurements of dielectric characteristics of woody tissues, automatic processing and storage of data: ЦАП – digital-to-analog converter (DAC); АЦП – analog-to-digital converter (ADC); БПФ – fast Fourier transform (FFT)

Для управления измерениями в полевых условиях используется влагозащищенный планшетный компьютер. Аналогово-цифровые преобразования производятся с помощью подключенной к компьютеру платы спектрометра. Непосредственно на объект электрические импульсы подаются через измерительный щуп. Результаты каждой операции выводятся на экран и сохраняются в компьютере в виде 2 текстовых файлов.

Процесс измерения (включая воздействие на объект – древесную ткань, обработку сигнала отклика и сохранение данных) длится менее 1 с. Для расчетов использовалась оригинальная встроенная функция пакета LabView 8.2. Основные затраты времени в процессе измерения характеристик деревьев в насаждении связаны с переходом оператора от дерева к дереву.

Оценка состояния дерева по визуальным признакам. Оценка состояния дерева проводилась с помощью стандартной визуальной шкалы категорий состояния [19]. Все обследованные деревья на ПП классифицировались с помощью шкалы, приведенной в табл. 1.

Дендрохронологические исследования. Дендрохронологические исследования проводились по общепринятой методике [39]. Был осуществлен отбор буровых образцов кедра (общее число кернов – 67). По этим образцам древесины после измерения ширины годичных колец с применением автоматизированной системы LINTAB [40] были построены индивидуальные древесно-кольцевые хронологии, которые датировались методом cross-dating в программном пакете TSAP [40]. В процессе перекрестной датировки устанавливался точный календарный год каждого годичного кольца дерева. Для определения даты возможного начала повреждений каждого исследованного дерева на ПП оценивались средний прирост и стандартное отклонение среднего прироста на протяжении следующих периодов времени: 1985–2004, 2005–2011, 2012–2017 гг.

Таблица 1

Шкала категорий состояния хвойных деревьев (по [23])

№	Категория	Состояние
1	Здоровые (без признаков ослабления)	Крона густая (для данной породы, возраста и условий местопрорастания); хвоя (листва) зеленая; прирост текущего года нормального размера
2	Ослабленные	Крона разреженная; хвоя светло-зеленая; прирост уменьшен, но не более чем наполовину; отдельные ветви засохли
3	Сильно ослабленные	Крона ажурная; хвоя светло-зеленая, матовая; прирост слабый, менее половины обычного; усыхание ветвей до 2/3 кроны; плодовые тела трутовых грибов или характерные для них дупла
4	Усыхающие	Крона сильно ажурная; хвоя серая, желтоватая или желто-зеленая; прирост очень слабый или отсутствует; усыхание более 2/3 ветвей
5	Свежий сухостой	Хвоя серая, желтая или красно-бурая; кора частично опала
6	Старый сухостой	Живая хвоя (листва) отсутствует; кора и мелкие веточки осыпались частично или полностью; стволовые вредители вылетели; в стволе мицелий дереворазрушающих грибов, снаружи плодовые тела трутовиков

Результаты исследования и их обсуждение

Каждое обследованное дерево на ПП характеризовалось девятью переменными: категорией состояния; шестью показателями среднего радиального прироста и стандартного отклонения радиального прироста в течение 1985–2004 гг., 2005–2011 гг. и 2012–2017 гг.; диэлектрическими характеристиками R_0 и $2r$. В табл. 2 приведено распределение исследованных деревьев по категориям состояния на изученных ПП.

Таблица 2

Распределение деревьев на ПП по категориям состояния

Категория состояния дерева	Количество деревьев на ПП, шт.		
	Выдринная	Бабушкин	Култук
1	23	0	0
2	0	0	3
3	0	8	7
4	0	12	4
5	0	8	2
Всего деревьев, шт.	23	28	16
Средняя категория состояния	1	4	3,3

Для сопоставления радиальных приростов с диэлектрическими показателями использовался метод канонических корреляций [28] и рассчитывались канони-

ческие корреляции между матрицей радиальных приростов и стандартных отклонений размерностью (67×6) и матрицей диэлектрических показателей размерностью (67×2) . Метод канонических корреляций позволяет исследовать зависимость между двумя множествами переменных: множеством L переменных, характеризующих радиальный прирост; множеством T переменных, характеризующих диэлектрические показатели тканей ствола дерева. Для двух множеств, содержащих соответственно 6 и 2 переменных, канонический анализ позволяет получить силу связей между линейными комбинациями переменных в каждом множестве:

$$w(i) = \sum_{k=1}^6 a(k)d(i, k);$$

$$v(i) = b(1)R_0(i) + b(2)2r(i).$$

Канонические веса $a(k)$, $b(1)$ и $b(2)$ характеризуют влияние конкретных переменных на канонические переменные w и v . Для расчета канонических переменных использовался пакет Statistica 10.0.

Расчеты показали, что для рассмотренных групп переменных коэффициент канонической корреляции равен 0,707, критерий χ^2 , характеризующий значимость канонической корреляции между L и T группами переменных, равен 44,68 и коэффициент канонической корреляции значим на уровне $p = 0,0000118$.

В табл. 3 приведены значения канонических весов для L и T групп переменных.

Таблица 3

Канонические веса для L и T групп переменных

Группа переменных	Переменная*	Веса для канонических переменных w и v
L	$d1$	0,087
	$s1$	-0,387
	$d2$	-1,213
	$s2$	0,803
	$d3$	-0,106
	$s3$	0,132
T	R_0	-0,358
	$2r$	1,028

* $d1$ и $s1$; $d2$ и $s2$; $d3$ и $s3$ – среднее значение и стандартное отклонение значений годовых колец соответственно для периодов 1985–2004 гг., 2005–2011 гг. и 2012–2017 гг.

Как следует из данных табл. 3, наибольший вклад в абсолютное значение канонической переменной $w(i)$ вносят средние значения и стандартное отклонение значений годовых колец для периода 2005–2011 гг., а вклад в $w(i)$ средних значений и стандартных отклонений значений годовых колец для периодов 1985–2004 гг. и 2012–2017 гг. существенно меньше.

Значения канонических переменных для каждого i -го дерева можно вычислить, используя следующие выражения:

$$w(i) = \sum_{k=1}^6 a(i) \frac{x(i, k) - \bar{x}(k)}{\sigma(k)} \rightarrow v(i) = b(1) \frac{R_0(i, k) - \bar{R}_0}{\sigma(R_0)} + b(2) \frac{2r(i, k) - 2\bar{r}}{\sigma(2r)},$$

где $\bar{x}(k)$ и $\sigma(k)$ – среднее значение и стандартное отклонение k -й переменной радиального прироста для всех деревьев; \bar{R}_0 и $\sigma(R_0)$ – среднее значение и стандартное отклонение переменной R_0 для всех деревьев; $2\bar{r}$ и $\sigma(2r)$ – среднее значение и стандартное отклонение переменной $2r$ для всех деревьев.

На рис. 5 отражена связь между значениями первой канонической переменной для L - и T -множеств.

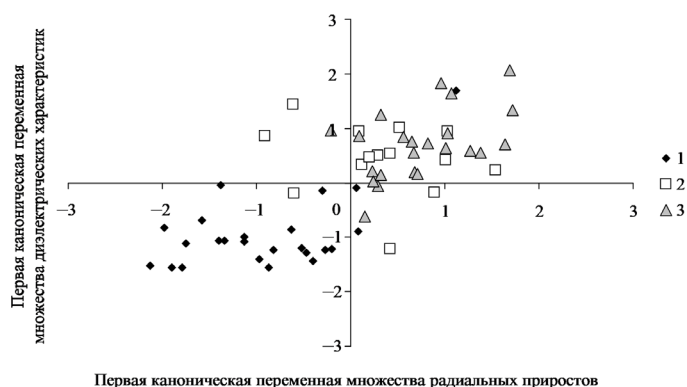


Рис. 5. Связь между значениями канонических переменных $w(i)$ и $v(i)$: 1 – деревья категорий 1 и 2; 2 – деревья категории 3; 3 – деревья категорий 4 и 5

Fig. 5. Correlation between the values of the canonical variables $w(i)$ and $v(i)$: 1 – trees of rank 1 and 2; 2 – trees of rank 3; 3 – trees of rank 4 and 5

Так как у деревьев с большим радиальным приростом $d2$ и $d3$ значение канонической переменной $w(i)$ снижается (знаки весов соответствующих переменных отрицательны), то деревьям категорий 1 и 2 с большим радиальным приростом соответствуют меньшие значения канонической переменной $w(i)$. Напротив, деревьям категорий 4 и 5 с меньшим радиальным приростом соответствуют большие значения канонической переменной $w(i)$.

Для разделения деревьев разных категорий состояния по значениям канонических переменных $w(i)$ и $v(i)$ использовался метод дискриминантного анализа. В табл. 4 приведены значения и доверительные вероятности λ -критерия Вилкса для групп переменных.

Таблица 4

Значения и доверительные вероятности λ -критерия Вилкса для L и T групп переменных

Группа переменных	λ -критерий Вилкса	Парциальный λ -критерий	F-критерий	p-уровень достоверности
L	0,49	0,76	9,75	0,0002
T	0,46	0,82	6,77	0,0022

Обе группы переменных дают значимый вклад в дискриминацию деревьев по категориям состояния. Классификационная матрица для разделения деревьев по категориям состояния с помощью канонических переменных (табл. 5)

указывает на высокую вероятность разделения деревьев категорий 1 и 2 и категорий 4–5 по значениям канонических переменных.

Таблица 5

Классификационная матрица для разделения деревьев по категориям состояния 1–5 с помощью канонических переменных

Категории состояния деревьев по визуальным признакам	Процент корректно идентифицированных деревьев	Категории состояния 1–5 деревьев по каноническим диэлектрическим характеристикам		
		1+2	3	4+5
1+2	88,46	23	0	3
3	20,00	2	3	10
4+5	92,31	1	1	24
<i>Всего</i>	74,63	26	4	37

Как видно, по диэлектрическим показателям трудно выделить деревья категории 3. Однако следует заметить, что характерное время их существования невелико, этапы ослабления проходятся этими деревьями достаточно быстро, и если на начальных этапах ослабления некоторые деревья категории 3 могут не отличаться по своим показателям от категории 2, то на поздних этапах ослабления деревья категории 3 по диэлектрическим характеристикам не отличаются от категории 4 и 5. Однако использовать диэлектрические параметры для классификаций деревьев категорий 4 и 5 не нужно, их состояние хорошо определяется по визуальным признакам (отсутствие хвои, потеря коры и т. п.). Деревья категории 3 (особенно на начальных этапах ослабления) по визуальным признакам плохо отличимы от категорий 1 и 2. Но для диагностических целей важно отделить деревья категорий 1, 2 от категории 3, т. к. именно деревья категории 3 являются кандидатами на отпад, и необходимо оценить долю таких образцов в насаждении. В табл. 6 приведена классификационная матрица, характеризующая разделение деревьев категорий 1, 2 и 3 по значениям канонических диэлектрических переменных.

Таблица 6

Классификационная матрица для разделения деревьев по категориям состояния 1, 2 и 3 с помощью канонических переменных

Категории состояния деревьев по визуальным признакам	Процент корректно идентифицированных деревьев	Категории состояния 1, 2, 3 деревьев по каноническим диэлектрическим показателям	
		1+2	3
1+2	88,46	23	3
3	86,67	2	13
<i>Всего</i>	87,80	25	16

Таким образом, если трудно различить деревья категорий состояния 1, 2 и 3 по визуальным показателям, то, используя канонические диэлектрические переменные, возможно разделить по диэлектрическим показателям трудно различимые по визуальным признакам здоровые деревья категорий 1 и 2 и находящиеся на ранних стадиях ослабления деревья категории 3 с вероятностью около

0,90. Деревья категории 3, по внешнему виду схожие с деревьями категорий 1 и 2, по своим диэлектрическим характеристикам уже неотличимы от категорий 4 и 5 и значимо отличаются по диэлектрическим характеристикам от категорий 1 и 2. Таким образом, сопряженная диагностика по визуальным и диэлектрическим показателям позволяет точнее классифицировать состояние деревьев в насаждении.

Заключение

Существуют очень тесные связи между визуальными категориями состояния деревьев, их радиальным приростом и диэлектрическими характеристиками тканей ствола. Последние, как показал анализ, можно использовать для экспресс-оценки состояния дерева. Данные классификационной матрицы для разделения деревьев по характеристикам состояния с помощью диэлектрических показателей свидетельствуют, что, используя их, можно получить достаточно надежные средние оценки состояния деревьев в насаждении. Полная автоматизация измерений с помощью диэлектрического спектрометра и их быстрота (для измерения диэлектрических показателей отдельного дерева требуется примерно 1 с) открывают возможности оценки состояния деревьев на ранних этапах их ослабления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белов А.В., Лямкин В.Ф., Соколова Л.П. Картографическое изучение биоты. Иркутск: Облмашинформ, 2002. 160 с. [Belov A.V., Lyamkin V.F., Sokolova L.P. *Cartographic Study of Biota*. Irkutsk, Oblmashinform Publ., 2002. 160 p.]
2. Воронин В.И. Бактериальная водянка хвойных в байкальских лесах: причины возникновения и риск эпифитотии // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых «Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды», Иркутск, 10–15 июля 2018 г.: в 2 ч. Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2018. С. 9–12. [Voronin V.I. Bacterial Infections of the Coniferous in the Baikal Forests: Causes and Risks of Epiphytetics. *Book of Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation and Schools of Young Scientists "Mechanisms of Resistance of Plants and Microorganisms to Unfavorable Environmental"*: In 2 Parts. Irkutsk, July 10–15, 2018. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2018, pp. 9–12]. DOI: [10.31255/978-5-94797-319-8-9-12](https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-9-12)
3. Воронин В.И., Соков М.К. Влияние сероорганических компонентов атмосферных выбросов на пихту сибирскую // Лесоведение. 2005. № 2. С. 62–64. [Voronin V.I., Sokov M.K. The Influence of Sulfurorganic Components of Atmospheric Emissions on Siberian Fir. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2005, no. 2, pp. 62–64].
4. Воронин В.И., Морозова Т.И., Ставников Д.Ю., Нечесов И.А., Осколков В.А., Буянтуйев В.А., Михайлов Ю.З., Говорин Я.В., Середкин А.Д., Шуварков М.А. Бактериальное повреждение кедровых лесов Прибайкалья // Лесн. хоз-во. 2013. № 3. С. 39–41. [Voronin V.I., Morozova T.I., Stavnikov D.Yu., Nechesov I.A., Oskolkov V.A., Buyantuyev V.A., Mikhaylov Yu.Z., Govorin Ya.V., Seredkin A.D., Shuvarkov M.A. Bacterial Damage of Cedar Forests of the Baikal Region. *Lesnoe khozaistvo*, 2013, no. 3, pp. 39–41].
5. Голодрига П.Я., Осипов А.В. Экспресс-метод и приборы для диагностики морозоустойчивости растений // Физиология и биохимия культурных растений. 1972. Т. 4,

вып. 6. С. 650–655. [Golodriga P.Ya., Osipov A.V. Express Method and Instruments for Diagnosing Frost Resistance of Plants. *Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rasteniy*, 1972, vol. 4, iss. 6, pp. 650–655].

6. Григорьев А.И. Эколого-физиологические основы адаптации древесных растений в лесостепи Западной Сибири. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2008. 195 с. [Grigor'yev A.I. *Ecological and Physiological Basis of Adaptation of Woody Plants in the Forest-Steppe of Western Siberia*. Omsk, OSPU Publ., 2008. 195 p.].

7. Грязькин А.В., Герасюта С.М., Бернацкий Д.П., Трубачева Т.А., Ковалев Н.В. Изменчивость величины импеданса древесных пород // Изв. СПбЛТА. 2012. № 198. С. 11–17. [Gryazkin A.V., Gerasjuta S.M., Bernatskij D.P., Trubacheva T.A., Kovalev N. Variability of Size of an Impedance of Tree Species. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2012, no. 198, pp. 11–17].

8. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии. Казань: Изд-во КГУ. 2008. 112 с. [Gusev Yu.A. *Fundamentals of Dielectric Spectroscopy*. Kazan, KSU Publ., 2008. 112 p.].

9. Дonyaкина С.С., Ковалев А.В., Тарасова О.В., Пальникова Е.Н., Астапенко С.А., Суховольский В.Г. Устойчивость пихты сибирской к ксилофагам: сопоставление визуальных и инструментальных оценок // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. XXXI, № 3–4. С. 26–30. [Donyakina S.S., Kovalev A.V., Tarasova O.V., Palnikova E.N., Astapenko S.A., Soukhovolsky V.G. The Stability of Fir Trees to Xylophages: Comparison of Visual and Instrumental Estimations. *Hvojnyye boreal'noy zony* [Coniferous of the boreal area], 2013, vol. XXXI, no. 3–4, pp. 26–30].

10. Зубкова Т.А., Мартынова Н.А., Белоусов В.М. Электрическое сопротивление структурных элементов биогеоценозов // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер.: Наука о Земле. 2011. Т. 4, № 2. С. 82–89. [Zubkova T.A., Martynova N.A., Belousov V.M. Electrical Resistance of Structural Elements of the Forest Biogeocoenoses. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”], 2011, vol. 4, no. 2, pp. 82–89].

11. Каширо Ю.П., Хасанов Н.Х., Дорожкин Е.М. Электрическое сопротивление тканей прикамбиального комплекса ствола у сосны обыкновенной и его диагностические возможности // Леса Урала и хозяйство в них: сб. науч. тр. Свердловск: УРГУ, 1988. Вып. 14. С. 183–184. [Kashiro Yu.P., Khasanov N.Kh., Dorozhkin E.M. Electrical Resistance of Tissues of the Trunk Cambial Complex of Scots Pine and Its Diagnostic Capabilities. *Forests of the Urals and Management in Them: Collection of Academic Papers*. Sverdlovsk, URGU Publ., 1988, iss. 14, pp. 183–184].

12. Ковалев А.В., Суховольский В.Г. Диэлектрический спектрометр для экспрессной оценки состояния растений // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике. Красноярск: ИЛ СО РАН. 2016. С. 105–106. [Kovalev A.V., Soukhovolsky V.G. Dielectric Spectrometer for Express State Estimation of Plants. *Monitoring and Biological Methods for Control of Pests and Pathogens of Woody Plants: From Theory to Practice*. Krasnoyarsk, IF SB RAS Publ., 2016, pp. 105–106].

13. Ковалев А.В., Јакуш R., Пальникова Е.Н., Суховольский В.Г. Диэлектрическая фурье-спектроскопия в оценке состояния деревьев в очагах массового размножения короедов // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. XXXIV, № 1–2. С. 44–51. [Kovalev A. Jakuš R., Palnikova E., Soukhovolsky V. Dielectric Fourier Spectroscopy to Assess the Condition of the Trees in the Outbreaks of Bark Beetles. *Hvojnyye boreal'noy zony* [Coniferous of the boreal area], 2016, vol. XXXIV, no. 1–2, pp. 44–51].

14. Краснобаев В.А., Воронин В.И. Аномальные оттепели как одна из причин повреждений кроны молодых хвойных деревьев в Южном Прибайкалье // География и при-

родные ресурсы. 2011. № 2. С. 75–78. [Krasnobayev V.A., Voronin V.I. Anomalous Thaws as a Cause of Young Coniferous Tree Crown Damage in the Southern Baikal Region. *Geographiya i prirodnyye resursy* [Geography and Natural Resources], 2011, no. 2, pp. 75–78].

15. Курило Ю.А., Григорьев А.И. Электрическое сопротивление как показатель устойчивости древесных растений в условиях нефтяного загрязнения // Проблемы региональной экологии. 2010. № 5. С. 111–115. [Kurilo Ju.A., Grigoriev A.I. Electric Resistance as an Indicator of Viability of Wood Plants. *Problemy regional'noy ekologii*, 2010, no. 5, pp. 111–115].

16. Курило Ю.А., Григорьев А.И. Изучение электрического сопротивления древесных растений в условиях нефтяного загрязнения почвы (на примере березы повислой) // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. Режим доступа: <https://science-education.ru/pdf/2015/3/69.pdf> (дата обращения: 18.08.18). [Kurilo Yu.A., Grigoriev A.I. The Study of the Electrical Resistance of Woody Plants in Conditions of Oil Contamination of Soil (for Example *Betula pendula*). *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 3]. DOI: [10.17513/spno.2015.3](https://doi.org/10.17513/spno.2015.3)

17. Курило Ю.А., Григорьев А.И. Применение электрометрического метода для диагностики влияния нефтешлама на жизнедеятельность березы повислой // Лесоведение. 2019. № 4. С. 304–310. [Kurilo Yu.A., Grigoriev A.I. Effect of Duration of Oil Sludge on Vital Activity of Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Studied by Electrical Method. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 4, pp. 304–310]. DOI: [10.1134/S002411481904003X](https://doi.org/10.1134/S002411481904003X)

18. Кушнеренко М.Д., Курчатова Г.П., Штефьрыца А.А., Печерская О.Н., Киевцова Е.В., Баштовая С.И. Комплексный метод определения жаро- и засухоустойчивости растений прибором «ТУРГОРОМЕР-1» (Т-1) // Экспресс-методы диагностики жаро-засухоустойчивости и сроков налива растений. Кишинев: ШТИЧИЦА, 1986. 36 с. [Kushnarenko M.D., Kurchatova G.P., Shtefyrtsa A.A., Pecherskaya O.N., Kiyevtsova E.V., Bashtovaya S.I. A Complex Method for Determining Heat and Drought Tolerance of Plants with the Device “TURGOROMER-1” (T-1). *Express Methods for Diagnosis of Heat and Drought Tolerance and Timing of Plant Ripening*. Kishinev, ShTICHITsA Publ., 1986. 36 p.].

19. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с. [*Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution*. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p.].

20. Маторкин А.А., Карасева М.А. Информативность импеданса прикамбиального комплекса тканей деревьев хвойных пород при диагностике их жизнеспособности // Современная физиология растений: от молекул до экосистем: материалы докл. Междунар. конф. Сыктывкар, 18–24 июня 2007 г. Сыктывкар, Коми НЦ УрО РАН, 2007. Ч. 2. С. 265–266. [Matorkin A.A., Karaseva M.A. Self-Descriptiveness of Impedance of Complex Adjacent to Cambium in Coniferous Tissues for Their Viability. *Proceedings of the International Conference “The Modern Plant Physiology: From Molecules to Ecosystems”, June 18–24 2007, Syktyvkar*. Syktyvkar, 2007, part 2, pp. 265–266].

21. Плешанов А.С., Морозова Т.И. Микромицеты пихты сибирской и атмосферное загрязнение лесов. Новосибирск: Гео, 2009. 115 с. [Pleshonov A.S., Morozova T.I. *Micromycetes of Siberian Fir and Atmospheric Pollution of Forests*. Novosibirsk, Geo Publ., 2009. 115 p.].

22. Положенцев П.А., Золотов Л.А. Динамика электрического сопротивления тканей луба сосны как индикатор изменения их физиологического состояния // Физиология растений. 1970. Т. 17, вып. 4. С. 830–835. [Polozhentsev P.A., Zolotov L.A. Dynamics of Electrical Resistance of Pine Bast Tissues as an Indicator of Changes in Their Physiological State. *Physiologiya rasteniy* [Soviet Journal of Plant Physiology], 1970, vol. 17, no. 4, pp. 830–835].

23. Правила санитарной безопасности в лесах: постановление Правительства Российской Федерации от 20 мая 2017 года № 607. М., 2017. [*Rules of Sanitary Safety in Forests: Decree of the Government of the Russian Federation of May 20, 2017 No. 607*. Moscow, 2017].

24. Раннев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений. М.: Академия, 2004. 336 с. [Rannev G.G., Tarasenko A.P. *Methods and Tools of Measurement*. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 336 p.].

25. Суховольский В.Г. Моделирование роста деревьев и взаимодействия лесных насекомых с древесными растениями: оптимизационный подход: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 1996. 31 с. [Soukhovolsky V.G. *Modeling of Tree Growth and Interactions of Forest Insects with Woody Plants: An Optimization Approach*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 1996. 31 p.].

26. Суховольский В.Г., Ковалев А.В., Сотниченко Д.В. Диэлектрическая спектроскопия прикамбиального комплекса тканей и экспресс-диагностика состояния древесных растений // Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2009. С. 335–336. [Soukhovolsky V.G., Kovalev A.V., Sotnichenko D.V. Dielectric Spectroscopy of the Near-Cambial Complex of Tissues and Express State Diagnostics of Woody Plants. *Ecological and Geographical Aspects of Forest Formation*. Krasnoyarsk, IF SB RAS Publ., 2009, pp. 335–336].

27. Тарусов Б.Н. Электропроводность как метод определения жизнеспособности ткани // Арх. ботан. наук. 1938. Т. 52, вып. 2. С. 5–16. [Tarusov B.N. Electrical Conductivity as a Method for Determining Tissue Viability. *Arkhiv botanicheskikh nauk*, 1938, vol. 52, iss. 2, pp. 5–16].

28. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс. 2007. 512 с. [Khalafyan A.A. *Statistica 6. Statistical Data Analysis*. Moscow, Binom-Press Publ., 2007. 512 p.].

29. Хамадулин Э.Ф. Основы радиоэлектроники. Методы и средства измерений. М.: Юрайт, 2018. 365 с. [Khamadulin E.F. *Fundamentals of Radio Electronics. Methods and Tools of Measurement*. Moscow, Urait Publ., 2018. 365 p.].

30. Шеверножук Р.Г. Биоэлектрическая активность ели в насаждениях, методика ее измерения // Изв. вузов. Лесн. журн. 1968. № 4. С. 36–40. [Shevernozhuk R.G. Bioelectric Activity of Spruce in Plantations, the Method for Its Measurement. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1968, no. 4, pp. 36–40]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1968/201968.pdf>

31. Шишмарёв В.Ю. Технические измерения и приборы. М.: Юрайт, 2019. 377 с. [Shishmarev V.Yu. *Technical Measurements and Devices*. Moscow, Urait Publ., 2019. 377 p.].

32. Carter J.K., Blanchard R.O. Electrical Resistance Related to Phloem Width in Red Maple. *Canadian Journal of Forest Research*, 1978, vol. 8, no. 1, pp. 90–93. DOI: [10.1139/x78-015](https://doi.org/10.1139/x78-015)

33. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics. I. Alternating Current Characteristics. *The Journal of Chemical Physics*, 1941, vol. 9, iss. 4, pp. 341–351. DOI: [10.1063/1.1750906](https://doi.org/10.1063/1.1750906)

34. Davis W., Shigo A., Weyrick R. Notes: Seasonal Changes in Electrical Resistance of Inner Bark in Red Oak, Red Maple, and Eastern White Pine. *Forest Science*, 1979, vol. 25, iss. 2, pp. 282–286. DOI: [10.1093/forestscience/25.2.282](https://doi.org/10.1093/forestscience/25.2.282)

35. Feldman Y., Ermolina I., Hayashi Y. Time Domain Dielectric Spectroscopy Study of Biological Systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, vol. 10, iss. 5, pp. 728–753. DOI: [10.1109/TDEI.2003.1237324](https://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1237324)

36. Fissenko S., Fissenko M. Vegetation Variations of Electric Resistance of Trees. *International Scientific Review*, 2016, no. 18(28), pp. 39–43.

37. Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. The Dielectric Properties of Biological Tissues: II. Measurements in the Frequency Range 10 Hz to 20 GHz. *Physics in Medicine & Biology*, 1996, vol. 41, no. 11, pp. 2251–2269. DOI: [10.1088/0031-9155/41/11/002](https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/002)
38. Ksenzhek O., Petrova S., Kolodyazhny M. Electrical Properties of Plant Tissues. Resistance of a Maize Leaf. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 2004, no. XXX, no. 3-4, pp. 61–67.
39. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Ed. by Cook E.R., Kairiukstis L.A. Dordrecht, Springer, 1990. 394 p. DOI: [10.1007/978-94-015-7879-0](https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0)
40. Rinn F. *TSAP Version 3.5. Reference Manual. Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation*. Heidelberg, Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
41. Schanne O.F., Ruiz P., Ceretti E. *Impedance Measurements in Biological Cells*. New York, John Wiley & Sons, 1978. 430 p.
42. Shortle W.S., Shigo A.L., Berry P., Abusambra J. Electrical Resistance in Tree Cambium Zone: Relationship to Rates of Growth and Wound Closure. *Forest Science*, 1977, vol. 23, iss. 3, pp. 326–329. DOI: [10.1093/forests/23.3.326](https://doi.org/10.1093/forests/23.3.326)
43. Soukhovolsky V. Insects-Xylophages in Sayan Mountain Forests after Windthrow: Population Dynamics Models. *Insects and Fungi in Storm Areas: Proceedings of the IUFRO Working Party 7.03.10 Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe, November 30, 2009, Zvolen, Slovakia*. Zvolen, National Forest Centre, 2009, pp. 20–23.
44. Wargo P.M., Skutt H.R. Resistance to Pulsed Electrical Current: An Indicator of Stress in Forest Trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 1975, vol. 5(4), pp. 557–561. DOI: [10.1139/x75-081](https://doi.org/10.1139/x75-081)

EXPRESS ESTIMATION OF THE PHYSIOLOGICAL STATE OF WOODY PLANTS BY DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF TREE STEM TISSUES

Vladislav G. Soukhovolsky¹, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [K-1740-2018](https://orcid.org/0000-0003-0407-2290),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-2290>

Viktor I. Voronin², Doctor of Biology; ResearcherID: [N-8292-2013](https://orcid.org/0000-0002-1467-9865),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1467-9865>

Vladimir A. Oskolkov³, Candidate of Biology; ResearcherID: [K-1961-2018](https://orcid.org/0000-0002-4339-1094),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4339-1094>

Anton V. Kovalev³, Candidate of Engineering; ResearcherID: [K-1756-2018](https://orcid.org/0000-0002-9744-768X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-768X>

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: soukhovolsky@yandex.ru

²Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, ul. Lermontova, 132, Irkutsk, 664033, Russian Federation; e-mail: bioin@sifibr.irk.ru, vosk@sifibr.isk.ru

³Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: sunhi.prime@gmail.com

Abstract. Dielectric spectroscopy methods for estimating the state of trees were considered. Dielectric characteristics describe cell membranes and conductivity of plant tissues. A pulsed Fourier transform dielectric spectrometer of an original design was used to measure the values of dielectric characteristics. The spectrometer was connected to a portable computer, which was used to control and power it. The device design allows to expressly (in about 1s) receive information on the dielectric characteristics of the tree trunk tissues in the frequency range from 1 to 100 kHz and to process, visualize and save the results of measurements on a computer in

the field conditions. Tree state estimates obtained with the pulsed Fourier transform dielectric spectrometer were compared with the visual tree characteristics and radial growth data. It is shown that there are differences in the values of dielectric characteristics in trees of different state categories and with different values of radial growth. Dielectric spectroscopy data, unlike subjective qualitative visual indicators of tree state, are quantitative and objective. The data can be obtained much faster and with less effort compared to estimates of tree characteristics by radial growth. The described method was used to estimate the state of Siberian pine (*Pinus sibirica*), Siberian fir (*Abies sibirica*) and Siberian spruce (*Picea obovata*) in forest plantations of the Baikal region. Studies were carried out both in control (undamaged) plantations and in those affected by bacterial infection. It is shown that the proposed method can be applied to the express state estimation of trees and the level of their damage.

For citation: Soukhovolsky V.G., Voronin V.I., Oskolkov V.A., Kovalev A.V. Express Estimation of the Physiological State of Woody Plants by Dielectric Characteristics of Tree Stem Tissues. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 70–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-70-85

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 17-29-05074офи_м).

Keywords: tree state, visual estimation, radial growth, dielectric characteristics, express measurements.

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

Поступила 16.12.19 / Received on December 16, 2019

УДК 630*187:582.475:630*644.2:630*43:630*221.01(470.13-924.82)

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-86-105

СТРОЕНИЕ ДРЕВОСТОЕВ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ СОСНЯКОВ

И.Н. Кутявин, канд. с.-х. наук, науч. сопр.; ResearcherID: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

А.В. Манов, канд. с.-х. наук, науч. сопр.; ResearcherID: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

А.Ф. Осипов, канд. биол. наук, науч. сопр.; ResearcherID: [P-9583-2015](https://orcid.org/0000-0003-0618-9660)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

М.А. Кузнецов, канд. биол. наук, науч. сопр.; ResearcherID: [P-9870-2015](https://orcid.org/0000-0001-6331-9578)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6331-9578>

Институт биологии Коми научный центр Уральского отделения РАН, ГСП-2, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия, 167982; e-mail: ivan.kutyawin@yandex.ru, manov@ib.komisc.ru, osipov@ib.komisc.ru, kuznetsov_ma@ib.komisc.ru

Аннотация. На территории Республики Коми в условиях северной тайги сосняки, занимающие порядка 1,8 млн га, представлены преимущественно сфагновыми, зеленомошными и лишайниковыми типами. Исследования проведены на Зеленоборском лесном стационаре Института биологии Коми НЦ УрО РАН в сосняках зеленомошных и сфагновых типов, развивающихся на месте пожаров и сплошных рубок. При господстве соснового элемента в древесном ярусе в его составе часто присутствуют ель, лиственница, береза и осина. Древостои сосняков формируют три типа возрастной структуры: условно-однообразные; условно-разнообразные, представленные одним поколением; ступенчато-разнообразные, состоящие из 2-3 поколений сосны. Оставленные при рубке деревья и уборка порубочных остатков на лесосеке паловым методом способствуют формированию древостоев ступенчато-разнообразного типа возрастной структуры. Коэффициенты вариации возраста деревьев в сосняках с одним поколением составляют 5,8...10,8 %, с 2-3 поколениями – 39,7...45,6 %. Количество поколений и тип возрастной структуры не оказывали влияния на изменяющиеся соответственно в пределах 25,2...49,5 % и 15,7...27,8 % диаметр и высоту деревьев в древостоях. В сосняках, развивающихся после пожаров, пик заселения сосной приходится на второе-третье десятилетие, а на вырубках максимум возобновления отмечен в первом-втором десятилетии после рубки. Амплитуда колебания возраста деревьев в условно-однообразных и условно-разнообразных сосняках, сформированных на вырубках, изменяется от 16 до 33, в послепожарных древостоях – от 30 до 45 лет. В ступенчато-разнообразных древостоях возраст деревьев колеблется от 120 до 167 лет, в поколениях – от 22 до 66 лет. Кривые, отражающие распределение деревьев по диаметру в древостоях сосняков имели левостороннее смещение, асимметрия представлена положительными значениями и изменялась от 0,05 до 1,03. Статистический анализ показал, что при схожем возрасте с сосной деревья сопутствующих в составе пород уступают в развитии как по диаметру, так и по высоте сосновому элементу. Выявлена тесная корреляционная связь между диаметром и высотой деревьев в древостоях. Взаимосвязь возраста с диаметром и высотой почти на всех изученных объектах изменяется от слабой до значительной. Установлено тесное соотношение между возрастом и диаметром деревьев в ступенчато-разнообразных сосняках ($R = 0,79...0,96$). Отмечено, что с увеличением амплитуды колебания возраста деревьев усиливается корреляционная связь диаметра и возраста.

Для цитирования: Кутивин И.Н., Манов А.В., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А. Строение древостоев северотаежных сосняков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 86–105. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-86-105

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на Европейском Северо-Востоке России», № ААА-А-А17-117122090014-8.

Ключевые слова: северная тайга, сосняки, строение, структура, вырубки, пожары.

Введение

Длительные наблюдения, проводившиеся на постоянных пробных площадях (ППП), позволяют оценить многолетнюю динамику развития лесных экосистем. Полученные данные о пространственно-временных изменениях строения древостоев лесных насаждений на ППП являются основой для разработки методов лесопользования в регионах страны [18], применяются для математического моделирования развития сосняков [2, 30, 31]. Структура лесных сообществ во многом определяет их устойчивость и продуктивность [5, 9, 24]. Отмечаемое учеными изменение климата приводит к учащению катастрофических явлений (пожары, ветровалы) в северных широтах и, как следствие, к трансформации структуры фитоценозов таежных лесов [22]. Поэтому многолетние непрерывные наземные наблюдения за динамикой лесных экосистем бореальной зоны представляют большой научный и практический интерес.

Сосновые леса на территории подзоны северной тайги Республики Коми занимают 1,8 млн га. Они представлены сфагновой (37 %), зеленомошной (34 %) и лишайниковой (21 %) группами типов леса. Остальные 8 % площади приходятся на долгомошные сообщества [3]. Изучению строения и структуры насаждений сосняков в условиях севера таежной зоны посвящено значительное количество работ [4–7, 10, 11, 13, 15, 19, 21, 24, 25, 29 и др.].

Цель данного исследования – выявление строения древостоев современных северотаежных сосняков, развивающихся на месте вырубок, гарей и находящихся под воздействием геологоразведки и нефтедобычи.

Объекты и методы исследования

Исследование строения древостоев сосновых насаждений выполнено в подзоне северной тайги, на территории Зеленоборского лесного стационара Института биологии Коми НЦ УрО РАН, располагающегося в Каджеромском лесничестве, Зеленоборском участковом лесничестве (64°28'53"с. ш.; 55°19'23"в. д.). С 1966 г. на этом объекте ведутся комплексные биогеоценологические наблюдения. Нами проанализированы данные по строению древостоев сосняков за 2016 г.

Проведены повторные исследования на восьми ППП в сосняках зеленомошной (ППП 4, 6, 8, 11, 19) и сфагновой (ППП 15, 17, 21) групп типов леса. Из рассматриваемых сосняков три спелых 120–150-летних сосняка (ППП 6, 11, 17) нами отнесены к естественно развивающимся постпирогенным сообществам. Пять (ППП 4, 8, 15, 19, 21) развиваются на вырубках 30–40-х гг. XX в. (табл. 1).

Ликвидация порубочных остатков проведена путем их сбора и последующего сжигания. Возраст деревьев, растущих на месте бывших вырубок, составляет 69–78 лет, что позволяет говорить о совпадении времени активного развития сосен и строительства располагающейся рядом железной дороги Ухта–Воркута [17]. На данный момент объекты исследования находятся под активным влиянием геологоразведки и добычи углеводородного сырья.

Обследование сосняков показало, что при господстве сосны (*Pinus sylvestris* L.) в составе древесного яруса также присутствуют: ель (*Picea obovata* Ledeb.), береза (*Betula pubescens* Ehrh., *B. pendula* Roth.), лиственница (*Larix sibirica* Ledeb.), редко осина (*Populus tremula* L.). Древостои III–Va классов бонитета имеют относительную полноту 0,3–1,5. Суммарный запас стволовой древесины в зависимости от возраста древостоя и типа леса изменяется от 93 до 303 м³/га. Сухостой представлен преимущественно соснами и аккумулирует от 1 до 36 м³/га стволовой древесины. Возраст хвойных здесь составляет 60–224 года, лиственных – 70–150 лет. В некоторых случаях возраст березы и осины установить не удалось в связи с их порослевым происхождением и ранним появлением сердцевинной гнили в комлевой части ствола. Плотность древесного яруса по мере увеличения возраста изменяется от 3620 до 790 шт./га (табл. 1).

Таблица 1

Краткая лесоводственно-таксационная характеристика сосняков

Тип леса (номер ППП)	Состав древостоя, ед.	Густота, шт./га	Запас, м ³ /га	Относительная полнота	Класс бонитета
Зеленомошный (6)	5С3Лц2Ос+Е,Б	790	277,4	0,86	IV
Зеленомошный (11)	9С1Лц едЕ,Б	890	303,4	1,00	IV
Осоково-сфагновый (17)	10С+Б	1240	103,9	0,70	Va
Сфагновый (21)	9С1Е+Б	3336	121,4	1,20	V
Зеленомошный (4)	8С1Е1Б+Ос едЛц	3551	265,1	1,50	III
Чернично-зеленомошный (8)	10С едЛц, Е, Б	3620	224,7	1,10	IV
Сфагновый (15)	6С2Е2Б+Лц	2601	92,9	1,05	V
Чернично-зеленомошный (19)	8С2Ос+Б едЕ	3593	285,8	1,20	IV

Примечание. Здесь и далее, в табл. 2–5, С – сосна; Е – ель; Лц – лиственница; Б – береза; Ос – осина.

На заложенных ППП проведены сплошные перечеты деревьев. Площадь ППП составляла 0,1–0,25 га и зависела от числа стволов доминирующего вида: не менее 300 экз. – в молодняках, 250 экз. – в средневозрастных, 150...200 экз. – в спелых [16]. К древостою относили деревья, имеющие на высоте 1,3 м диаметр ≥ 6 см. Подрост (особи древесных растений с диаметром ствола на высоте 1,3 м < 6 см или возрастом более 10 лет) учитывали также на всей площади ППП. Для оценки возрастной структуры использовали керны, отобранные при помощи возрастного бурава на высоте от 0,2 до 1,3 м у 30–60 сосен из разных ступеней толщины и у 15–30 сопутствующих пород. У модельных деревьев измеряли диаметр и высоту. Все полученные образцы (керны) в лабораторных

условиях обрабатывали с использованием методов, предложенных и апробированных ранее [10, 23]. Возраст и ширину годичных колец подсчитывали при помощи изображений, полученных со сканера высокого разрешения, и программ CDendro 9.0.1 и CooRecorder 9.0.1. При недостаточной видимости годичных колец, например березы, использовали установку LINTAB с компьютерной программой TsapWin.

Таксационные показатели древостоев рассчитывали по нормативам [12]. Статистический анализ их структуры проводили по И.И. Гусеву [4]. Для сравнения различных статистических выборок при оценке коэффициента вариации (CV) учитывали следующие придержки: при $CV < 10\%$ – малая, $CV = 10 \dots 30$ – средняя и при $CV > 30\%$ – высокая. Для характеристики возрастной структуры использовали классификацию Г.Е. Комина, И.В. Семечкина [8], при этом сначала анализировали возрастной состав популяций в древостоях на ППП, далее определяли поколения и характеризовали их структуру, после этого оценивали возрастную структуру древостоя в целом. Для оценки коэффициентов регрессионных уравнений и их погрешностей между диаметром и высотой деревьев, а также зависимостей возраста деревьев от их диаметра и высоты стволов в древостоях сосняков использовали программы Curve Expert 1.4 и Excel 2007.

Результаты исследования и их обсуждение

Возрастная структура древостоев. Является одним из основных показателей, отражающих экономическую и экологическую устойчивость исследуемого региона в лесопользовании. Она необходима для фиксации истории развития древостоев, оценки их устойчивости и процессов лесообразования. Данный элемент структуры ценоза, находящийся под воздействием как экзогенных, так и эндогенных факторов, постоянно претерпевает пространственно-временные изменения [8, 19, 20, 26–28, 32]. Определение возраста в тот или иной период развития представляет большой интерес при проведении лесохозяйственных мероприятий, направленных на улучшение продукционных процессов.

Исследованные северотаежные сосняки сформированы 1-3 поколениями сосны. В сфагновых сообществах на ППП 17 и 21 нами выявлено от двух до трех обособленных поколений. В кустарничково-сфагновом сосняке (ППП 17) второе поколение древостоя образовалось после низового пожара, произошедшего в 30-х гг. XX в. Не исключено, что этот пожар возник как следствие влияния антропогенного фактора. Сосняк сфагновый (ППП 21) сформирован тремя поколениями: первое – из деревьев 160-летнего, второе – из единичных деревьев в возрасте 107 лет и третье – из деревьев 67-летнего возраста (табл. 2).

Причиной образовавшихся разрывов поколений в данном сосняке послужили два следующих фактора: вырубка части древостоя, при этом около 8% деревьев VI–VIII классов возраста было оставлено, по-видимому, в качестве семенных (рис. 1, в, з); паловый пожар, возникший в результате уборки порубочных остатков и уничтоживший подрост сосны предварительного возобновления. Эти два фактора способствовали массовому возобновлению сосны, а в настоящее время они формируют поколения III и IV классов возраста.

Таблица 2

Параметры возрастной структуры древостоев сосняков

Порода	Поколение	Количество деревьев, %	Средний возраст, лет	Основное отклонение от среднего возраста	CV , %	A	E	Амплитуда колебаний возраста в поколении, лет
<i>Зеленомошный (ППП 6) У.Р.</i>								
С	I	100	127	2	8,5	-0,60	-0,10	102–146
Лц	I–III	100	155	18	30,6	0,80	-1,30	112–224
	I	38	220	–	–	–	–	215–224
	II	25	150	–	–	–	–	142–157
	III	37	115	–	–	–	–	112–117
Е	I	100	97	5	16,8	0,90	-0,80	72–124
Б	I–II	100	115	–	–	–	–	69–152
<i>Зеленомошный (ППП 11) У.Р.</i>								
С	I	100	120	2	7,2	-0,40	-0,90	104–133
Лц	I	100	142	–	–	–	–	136–148
<i>Осоково-сфагновый (ППП 17) С.Р.</i>								
С	I–II	100	151	12	45,6	-0,07	-1,98	72–238
	I	53	213	4	7,8	-0,93	1,11	172–238
	II	47	80	3	14,1	2,23	3,95	72–110
<i>Сфагновый (ППП 21) С.Р.</i>								
С	I–III	100	78	4	39,7	2,35	4,09	51–171
	I	12	160	6	9,1	-1,76	3,07	132–171
	II	2	107	–	–	–	–	107
	III	86	67	1	6,0	-1,42	3,98	51–72
Е		100	148	14	23,3	0,37	0,63	78–175
<i>Зеленомошный (ППП 4) У.Р.</i>								
С	I	100	60	1	10,8	-0,07	-0,07	43–74
Е	I	100	67	1	9,4	0,71	-0,58	55–78
Б	I	100	72	3	11,7	-0,95	-0,64	57–79
Ос	I	100	69	–	–	–	–	69–73
Лц	I	100	69	–	–	–	–	69–75
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 8) У.Р.</i>								
С	I	100	71	7	9,3	-1,60	2,80	46–78
Б	I	100	76	–	–	–	–	51–77
<i>Сфагновый (ППП 15) У.О.</i>								
С	I	100	69	1	5,8	-0,64	0,17	59–75
Е	I	100	71	1	7,9	-2,25	8,04	49–79
Б	I	100	71	1	–	–	–	57–84
Лц	I	100	69	1	–	–	–	64–72
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 19) У.Р.</i>								
С	I	100	62	1	6,6	-1,60	2,99	48–69
Б	I	100	67	–	–	–	–	60–74

Примечание. Здесь и далее, в табл. 3–5, CV – коэффициент вариации; A – асимметрия; E – эксцесс; У.Р. – условно разновозрастные; С.Р. – ступенчато-разновозрастные; У.О. – условно-одновозрастные.

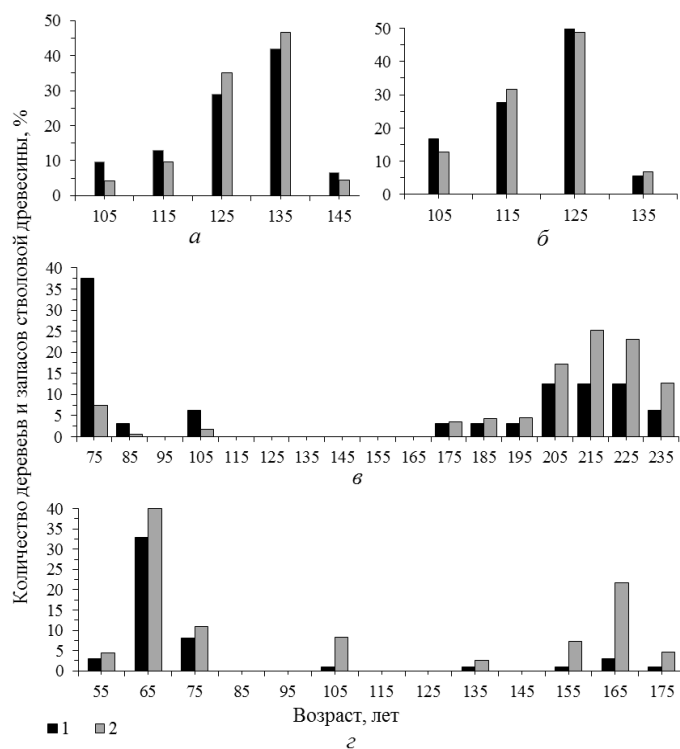


Рис. 1. Распределение деревьев (1) и запасов стволовой древесины (2) по возрасту: *a, б* – условно-разновозрастные сосняки зеленомошные послепожарного происхождения (ППП 6, 11); *в, г* – ступенчато-разновозрастные сосняки сфагновые (ППП 17, 21)

Fig. 1. Distribution of trees (1) and stem wood stocks (2) by age: *a, б* – conditionally uneven-aged green-moss pine stands of post-fire origin (sample plot (SP) 6, 11); *в, г* – stepped uneven-aged sphagnum pine stands (SP 17, 21)

Оба сосняка имеют схожий характер распределения деревьев по возрасту и относятся к ступенчато-разновозрастному типу структуры с разрывом между поколениями от 35 до 65 лет. В ходе проведенных нами [10] исследований на границе Приполярного и Северного Урала (Республика Коми) в естественно развивающихся сфагновых сосняках был выявлен аналогичный тип возрастной структуры древостоев. Отмечено, что при отсутствии пирогенного фактора сфагновые сосняки способны формировать три и более обособленных поколения деревьев. Причинами развития такой структуры возраста, кроме описанного выше длительного отсутствия возобновления, являются: особенности рельефа местности (заболоченность) и суровые климатические условия.

Для ступенчато-разновозрастных сосняков характерно большое варьирование возраста деревьев ($CV = 40\text{--}46\%$). В пределах отдельных поколений этот показатель представлен малыми (6...9 %) и средними (14 %) значениями. Амплитуда колебаний возраста деревьев в древостоях изменяется от 120 до 166 лет, в поколениях от 20 до 66 лет. Асимметрия в осоково-сфагновом сосняке (ППП 17) находится около нулевого значения ($-0,07$). Показатель меры крутости, эксцесса

($E = -1,98$), указывает на равное преобладание деревьев в двух поколениях. При $E \geq -2$ кривая распадается на две отдельные кривые [4]. В сосняке сфагновом (ППП 21) преобладает средневозрастное 67-летнее поколение, что подтверждается высокими значениями асимметрии (2,35) и эксцесса (4,09). Проведенный анализ подтвердил, что эти статистические показатели во всех случаях достоверны на определенном вероятностном уровне, т. е. их основные ошибки (S_A, S_E) больше рассчитанных величин ($A < S_A$ и $E < S_E$).

Распределение запасов стволовой древесины в ступенчато-разновозрастных сосняках по поколениям носит неравномерный характер. Так, на ППП 21 основной запас стволовой древесины (56 %) концентрируется в первом 67-летнем поколении деревьев. В кустарничково-сфагновом сосняке (ППП 17) при почти равном распределении числа деревьев по двум поколениям до 90 % запаса древесины формирует первое поколение сосны. Таким образом, ступенчато-разновозрастный тип структуры древостоев образуется под воздействием антропогенного и пирогенного факторов в совокупности.

Сосняки зеленомошные, развивающиеся на месте старого пожара на ППП 6, 11, представлены одним разновозрастным поколением деревьев. Обследование возраста деревьев показало (табл. 2), что послепожарное возобновление сосны растягивается на 2-3 класса возраста с колебанием от 29 до 44 лет.

Коэффициенты варьирования возраста представлены малой изменчивостью (7...9 %). Асимметрия характеризуется отрицательными значениями (от -0,4 до -0,6), указывая, что в разновозрастном древостое преобладают деревья старших поколений. Согласно рис. 1, а, б, послепожарный пик заселения сосны приходится на второе и третье десятилетия (71...78 % от их общего числа). Мера крутости представлена плосковершинными кривыми с отрицательными значениями ($E = -0,9...-0,1$). Распределение запасов стволовой древесины по возрасту схоже с кривыми распределения числа деревьев. Следовательно, древостой сосняков, развивающихся на месте пожаров, относятся к условно-разновозрастному типу возрастной структуры и состоят из деревьев одного разновозрастного поколения.

Сосновые древостои, формирующиеся на вырубках, представлены одним поколением деревьев. Проведенный нами анализ древесных кернов показал хороший начальный прирост по радиусу у большинства деревьев сосны, что свидетельствует о ее последующем возобновлении после рубки. Обычно подрост, развивающийся под пологом древостоев, имеет довольно мелкий прирост по радиусу, что связано с его угнетением со стороны материнского древостоя [10]. Фитоценоз сосняка сфагнового (ППП 15) представлен деревьями одного класса возраста с колебанием возраста в 16 лет. Согласно классификации Г.Е. Комина, И.В. Семечкина [8], такие древостои сосняков можно отнести к условно-одновозрастным.

В сосняках зеленомошных (ППП 4, 8, 19) возобновительный процесс растягивается от 22 до 33 лет, выходя за пределы класса возраста. Древостои этих сосняков можно отнести к условно-разновозрастному типу возрастной структуры. В одновозрастном сосняке (ППП 15) коэффициент варьирования возраста составляет 5,8 %. В условно-разновозрастных сосняках с увеличением амплитуды колебания возраста вариация достигает 10,8 %.

Средний возраст в фитоценозах сосняков, развивающихся на вырубках, составляет 60–70 лет, а возраст самых старших деревьев – 69–78 лет. Таким образом, средние значения возраста смещены к максимальному (рис. 2). Асимметрия рядов распределения деревьев по возрасту представлена отрицательными значениями, изменяясь от малой (–0,1) до большой (–1,6). Мера крутости характеризуется высоковершинными положительными значениями (0,2...3,0), тем самым возрастные значения группируются около среднего значения (табл. 2).

Распределение деревьев по возрасту показывает, что пик заселения сосны на вырубках приходится на первое и второе десятилетия после рубки (рис. 2).

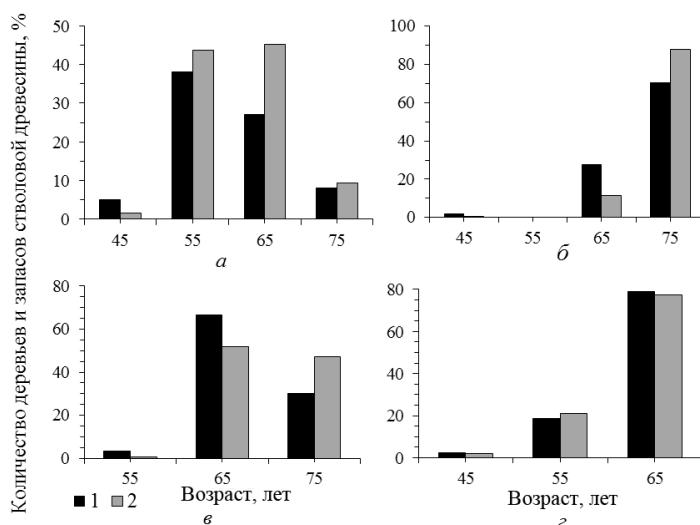


Рис. 2. Распределение деревьев (1) и запасов ствольной древесины (2) по возрасту в древостоях сосняков, развивающихся на вырубках: а–в – условно-разновозрастные (ППП 4, 8, 19); г – условно-одновозрастный (ППП 15)

Fig. 2. Distribution of trees (1) and stem wood stocks (2) by age in pine stands developing after clearcuts: а–в – conditionally uneven-aged (SP 4, 8, 19); г – conditionally even-aged (SP 15)

Лесообразовательные процессы на вырубках могут проходить в течение длительного периода. Отмечено, что одновременное и равномерное возобновление в сосняках встречается нечасто [21]. По данным С.С. Зябченко [7], в условно-разновозрастных насаждениях сосняков, формирующихся на вырубках и гарях, возобновление длится 60–80 лет. Этап заселения сосны после сплошной рубки сосняков долгомошного и сфагнового типов Архангельской области длится 25–35 лет [1]. В постпирогенных сосновых древостоях Северного Приуралья с аналогичным возрастным строением послепожарные этапы возобновления занимают от 27 до 80 лет [10].

Лиственница, входящая в состав древостоев сосняков, образует от одного до трех поколений и представлена, как и сосна, одновозрастным или ступенчато-разновозрастным типом возрастной структуры (табл. 2). Во втором из названных типов при выделении поколений лиственницы возобновление проходит короткими периодами в пределах одного класса возраста – от 2 до 15 лет. На вырубках средний возраст лиственницы соответствует возрасту сосны, однако периоды возобновления намного короче и составляют 7–9 лет.

Ель и береза на вырубках формируют преимущественно одно поколение деревьев. Максимальный возраст ели выше или равен возрасту сосны. Амплитуда колебания возраста ели в условно-разновозрастных сосняках составляет 20–50 лет, в ступенчато-разновозрастном сосняке (ППП 21) – 97 лет. Показатели асимметрии и эксцесса возраста ели имеют как положительные, так и отрицательные значения.

На вырубках с применением паловой уборки порубочных остатков (ППП 4, 8, 15, 19) береза возобновляется за 14–28 лет. Средний возраст данного элемента на 4–12 лет больше, чем у сосны. В условиях Кольского полуострова средние показатели возраста березы ниже, чем сосны на 2–5 лет [21]. Автором отмечено, что с продвижением на север позиции сосны относительно березы становятся более устойчивыми. Такие же выводы получены и другими учеными [14, 15] на основе исследований, проведенных в молодняках.

Строение древостоев по диаметру (толщине) деревьев. Данный показатель представляет большой интерес для оценки товарной и сортиментной структуры древесины, что позволяет определять, какие лесохозяйственные мероприятия необходимы в определенный период развития древостоев [18].

Строение древостоев по толщине деревьев тесно связано с возрастной структурой [1, 6, 19, 21]. Данные о диаметре деревьев на высоте 1,3 м показывают, что амплитуда колебания этого показателя в ступенчато- (ППП 17, 21) и условно-разновозрастных (ППП 6, 11) древостоях сосняков изменяется от 17 до 34 см, в условно-разновозрастных и условно-одновозрастном сосновых древостоях, развивающихся на вырубках, – от 10 до 22 см. Во всех исследованных нами фитоценозах сосняков минимальные значения диаметров начинаются преимущественно с 6-сантиметровой ступени. Максимальные диаметры в зеленомошных и сфагновых типах сосняков естественного развития составляют 42 и 29 см соответственно. Независимо от типа возрастной структуры древостоев, коэффициенты варьирования толщины деревьев характеризуются средней и большой изменчивостью (27,1...39,8 %). Большая вариация толщины деревьев в сосняках, развивающихся на вырубках, свидетельствует о растянутости диаметров в процессе их формирования. Для условно-разновозрастных и ступенчато-разновозрастных сосняков постпирогенного развития характерен высокий показатель варьирования по толщине. Так, в условиях Северного Приуралья в условно-разновозрастных древостоях послепожарного происхождения коэффициенты варьирования диаметров достигают 45 %, в ступенчато-разновозрастных древостоях – 53 % [10]. Согласно данным Б.А. Семенова с соавт. [19], в разновозрастных сосняках Крайнего Севера коэффициент изменчивости диаметра составляет 104 %. Авторами отмечено, что наличие старовозрастных и крупных по толщине деревьев резко увеличивает процент вариации и колебание диаметров в древостоях.

В постпирогенных условно-разновозрастных сосняках зеленомошных (ППП 6 и 11) распределение деревьев по толщине близко к нормальному (рис. 3, а), асимметрия близка к нулю (0,05–0,20). Во всех остальных исследуемых ценозах асимметрия распределения деревьев по диаметру представлена положительными показателями (0,5...2,0), левая ветвь кривой больше правой, что указывает на преобладание деревьев мелких категорий крупности (рис. 3, б, в). Положительные значения асимметрии распределения деревьев по диаметру в сосняках различных типов формирования на вырубках отмечались ранее [14, 21].

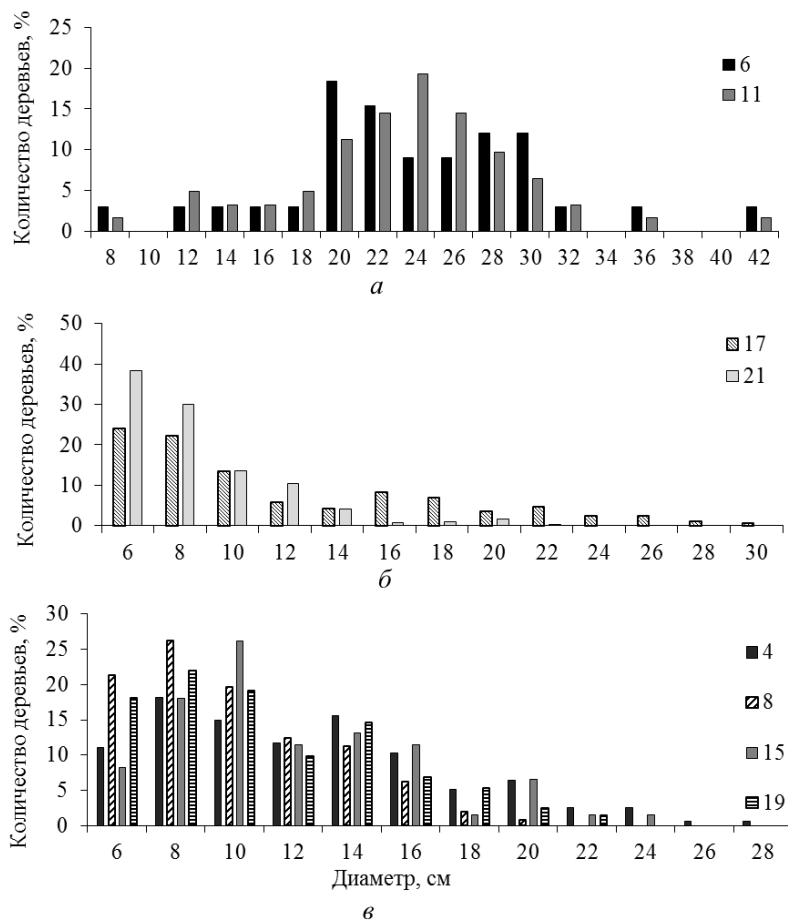


Рис. 3. Распределение числа деревьев сосны по ступеням толщины в условно-разновозрастных сосняках зеленомошных постпирогенного происхождения (а), ступенчато-разновозрастных древостоях (б), условно-разновозрастных и условно-одновозрастных сосняках, развивающихся на вырубках (в) (в легенде приведены номера ППП)

Fig. 3. Diameter distribution of pine trees in conditionally uneven-aged green-moss pine stands of post-pyrogenic origin (а), stepped uneven-aged pine stands (б), conditionally uneven-aged and conditionally even-aged pine stands developing after clearcuts (в) (SP numbers are given in the legend)

Средний диаметр древостоев исследуемых ценозов, развивающихся на вырубках, в возрасте 60–70 лет изменяется от 10 до 13 см, уступая по толщине в 2,0–2,5 раза самым толстым деревьям в насаждениях. В ступенчато-разновозрастных сосняках сфагновых типов (ППП 17, 21) характер распределения деревьев по толщине схож с характером распределения деревьев в сосняках, формирующихся на вырубках: преобладают деревья мелких категорий крупности (от 6 до 12 см). Асимметрия представлена левосторонними кривыми (1,03–1,85). В первых поколениях превалируют крупные по толщине деревья сосны, асимметрия отрицательная, тогда как в младших более многочисленны мелкие по толщине деревья, асимметрия положительная (табл. 3).

Таблица 3

Строение древостоев по диаметру в сосняках

Порода	Поколение	Средний возраст, лет	Средний диаметр, см	Основное отклонение от среднего диаметра	CV, %	A	E	Амплитуда колебаний диаметра в поколении, см
<i>Зеленомошный (ППП 6) У.Р.</i>								
С	I	127	22,3	1,20	30,8	0,21	0,69	7,1–40,7
Лц	I–III	155	26,1	5,30	57,6	–0,01	–2,70	10,5–42,4
Ос	I	124	34,2	1,50	9,7	0,39	–1,63	30,8–38,7
Е	I	97	11,9	1,70	44,4	0,07	–1,87	6,1–19,6
Б	I–II	115	10,7	0,80	28,9	0,37	0,10	6,1–16,6
<i>Зеленомошный (ППП 11) У.Р.</i>								
С	I	120	23,4	0,75	25,2	0,05	1,44	8,0–42,0
Лц	I	142	23,9	4,43	45,4	–0,23	–1,24	8,3–36,6
Е	I	–	11,9	1,30	27,9	0,54	–0,93	8,3–16,9
Б	I	–	9,7	0,90	33,0	1,40	1,50	6,7–17,5
<i>Осоково-сфагновый (ППП 17) С.Р.</i>								
С	I–II	157	12,1	0,50	49,5	1,03	0,01	6,1–29,1
	I	213	21,3	0,70	13,3	–0,66	1,44	14,2–29,1
	II	80	9,0	0,42	18,2	0,70	–0,90	6,0–11,9
Б	I	–	7,9	0,40	20,0	0,67	–0,42	6,1–11,1
<i>Сфагновый (ППП 21) С.Р.</i>								
С	I–III	78	8,7	0,14	34,0	1,85	4,85	6,1–22,9
	I	160	18,1	1,37	18,5	–0,87	1,42	12,4–22,9
	II	107	12,8	–	–	–	–	12,8
	III	67	8,9	0,35	25,8	0,67	–0,16	6,1–15,0
Е	I	148	10,5	0,69	31,9	0,42	–0,74	5,9–17,2
Б	I	133	9,1	0,83	41,7	1,73	2,50	5,9–19,1
<i>Зеленомошный (ППП 4) У.Р.</i>								
С	I	60	13,3	0,60	39,8	0,49	–0,54	6,1–28,2
Е	I	67	7,8	0,20	24,3	2,13	7,36	6,1–17,5
Б	I	72	8,2	0,40	23,5	0,60	–0,86	6,1–12,1
Ос	I	69	11,0	–	–	–	–	7,3–13,7
Лц	I	69	9,3	–	–	–	–	8,5–11,7
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 8) У.Р.</i>								
С	I–II	71	10,0	3,20	31,7	0,80	–0,10	6,1–19,4
	I	72	10,0	3,20	31,6	0,46	–0,33	6,1–16,2
	II	46	6,1	–	–	–	–	6,1
Б	I	76	14,0	–	–	–	–	6,0–14,0

Окончание табл. 3

Порода	Поколение	Средний возраст, лет	Средний диаметр, см	Основное отклонение от среднего диаметра	CV , %	A	E	Амплитуда колебаний диаметра в поколении, см
<i>Сфагновый (ППП 15) У.О.</i>								
С	I	69	12,2	0,50	34,4	0,58	0,09	6,3–24,5
Е	I	71	7,5	0,30	22,7	0,72	0,16	6,1–12,0
Б	I	71	7,8	0,20	19,8	0,79	–0,07	6,1–12,4
Лц	I	69	9,1	1,00	40,8	1,07	0,32	6,3–16,0
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 19) У.Р.</i>								
С	I	62	11,1	0,28	35,5	0,79	–0,09	6,1–22,9
Б	I	67	8,5	0,40	25,8	1,82	5,36	6,1–16,2
Ос	I	Не опр.	9,7	0,60	45,4	4,23	23,90	6,1–36,6

Мера крутости в большинстве исследованных сосняков представлена положительными значениями ($E > 0$), что свидетельствует о высоковершинности кривых распределения деревьев по толщине и группировании их около среднего значения. Выраженная отрицательная мера крутости ($-0,54$) – в сосняке зеленомошном (ППП 4), кривая плосковершинная. В древостое отмечено относительно равномерное распределение деревьев по ступеням толщины от 6 до 16 см, где количество их в каждой ступени составляет 10...18 %. В остальных типах сосняков, развивающихся на вырубках, наибольшая доля деревьев приходится на шестую–десятую ступень толщины (25...40 %).

В сосняках зеленомошных (ППП 6 и 11) лиственница старше сосны на один класс возраста, но превосходит ее или близка к ней по среднему показателю диаметра. У лиственницы с увеличением числа поколений и амплитуды колебания диаметров с 10 до 32 см возрастает варьирование толщины деревьев с 40,8 до 57,6 %. Остальные сопутствующие древесные породы при близком сосновозрасте характеризуются меньшими показателями среднего диаметра.

Ель и береза в фитоценозах, сформированных на вырубках, имеют средние значения варьирования диаметров – от 20 до 26 %. В сосняке сфагновом (ППП 21) вариация диаметра березы и ели представлена показателями более 30 %. Его минимальные значения схожи со значениями сосны, однако максимальные ниже в 1,3–2,0 раза. Кривые, отражающие значения асимметрии и эксцесса, имеют близкие характеристики формы с кривыми, показывающими эти же значения для сосны. Таким образом, в условиях северной тайги при почти одинаковом возрасте сосна обладает более быстрыми темпами накопления древесины по диаметру, чем сопутствующие ей древесные породы.

Строение по высоте. Высотная структура древостоев является одним из основных показателей продуктивности, состояния лесных фитоценозов и зависит от природно-климатических условий того или иного региона [21].

Во всех исследованных сосняках вариация высоты деревьев представлена средними показателями – 13...27 % – независимо от возрастной структуры древостоев и лесорастительных условий (табл. 4).

Таблица 4

Строение древостоев по высоте в сосняках

Порода	Покое-ние	Коли-чество дере-вьев, %	Средний возраст, лет	Сред-няя высо-та, м	Основное откло-нение от средней высоты	<i>CV</i> , %	<i>A</i>	<i>E</i>	Амплитуда колебаний высоты в поколении, м
<i>Зеленомошный (ППП 6) У.Р.</i>									
С	I	100	127	18,1	0,6	17,8	-0,80	-0,22	9,9–22,3
Лц	I–III	100	155	19,3	1,6	22,7	-0,19	-2,10	13,8–24,2
Ос	I	100	124	22,1	0,4	4,0	-0,24	-3,00	21,2–23,0
Е	I	100	97	9,4	1,5	50,4	0,01	-2,10	3,5–16,0
Б	I–II	100	115	11,2	0,8	25,8	-1,00	0,60	4,6–14,5
<i>Зеленомошный (ППП 11) У.Р.</i>									
С	I	100	120	19,3	0,6	13,4	-2,09	6,52	11,0–23,0
Лц	I	100	142	–	–	–	–	–	17,3–18,1
<i>Сфагновый (ППП 17) С.Р.</i>									
С	I–II	100	157	11,3	0,7	27,1	0,29	-1,47	7,0–16,0
	I	53	213	14,0	0,5	12,1	-0,29	-1,71	11,5–16,0
	II	47	80	8,6	0,3	10,1	-0,47	-0,14	7,0–11,0
Б		100	–	7,0	–	–	–	–	6,1–8,6
<i>Сфагновый (ППП 21) С.Р.</i>									
С	I–III	100	78	9,0	0,2	19,3	0,62	0,18	5,5–13,3
	I	12	160	11,3	0,8	16,7	-0,60	0,27	8,25–13,3
	II	2	107	12,8	–	–	–	–	12,8
	III	86	67	8,6	0,2	15,7	0,13	-0,46	5,5–11,3
Е	I	100	148	7,4	0,5	31,9	0,40	-0,70	4,0–12,0
Б	I	100	133	6,8	0,4	28,0	1,35	1,21	5,0–11,5
<i>Зеленомошный (ППП 4) У.Р.</i>									
С	I	100	60	13,7	0,3	21,6	-0,45	-0,90	7,6–18,3
Е	I	100	67	8,9	0,5	26,6	0,71	-0,58	5,7–13,8
Б	I	100	72	13,0	0,8	17,7	0,03	-0,80	9,4–16,3
Ос	I	100	69	14,8	–	–	–	–	10,4–17,5
Лц	I	100	69	10,4	–	–	–	–	9,6–12,5
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 8) У.Р.</i>									
С	I–II	100	71	13,5	2,1	15,7	-0,10	-0,40	9,0–18,3
	I	98	72	13,6	2,1	15,4	-0,10	-0,30	9,0–18,3
	II	2	46	10,5	–	–	–	–	10,5
<i>Сфагновый (ППП 15) У.О.</i>									
С	I	100	69	8,9	0,5	27,8	0,82	-0,19	5,1–14,6
Е	I	100	71	6,0	0,2	20,7	0,15	-1,24	4,2–8,2
Б	I	100	71	8,1	–	–	–	–	6,6–10,9
Лц	I	100	69	6,1	–	–	–	–	4,0–10,5
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 19) У.Р.</i>									
С	I	100	62	13,7	0,3	15,8	-0,20	-1,00	9,7–17,6

В условно-разновозрастных послепожарных сосняках зеленомошного типа (ППП 6, 11) максимальные высоты составляют 23 м, минимальные – 11 м (амплитуда колебания высот – 12 м). Во всех остальных исследованных древостоях амплитуда колебания высот варьирует от 8 до 11 м, свидетельствуя о неравномерном развитии сосны по высоте. В ступенчато-разновозрастных сосняках сфагновых (ППП 17, 21) высота деревьев составляет 8...9 м, в одновозрастных и условно-разновозрастных древостоях, развивающихся на вырубках (ППП 4, 8, 15, 19), этот показатель несколько выше (8...11 м). По данным Б.А. Семенова с соавт. [19], в сосняках Крайнего Севера бóльшим диапазоном высот характеризуются сосняки в возрасте от 40 до 80 лет.

Распределение деревьев по ступеням высоты в исследуемых сосновых древостоях представлено асимметричными кривыми. Мера косости в сосняках сфагновых имеет положительные значения (0,3...0,8), а в зеленомошных – отрицательные (–2,1...–0,1), что указывает на преобладание деревьев со значением высоты, превосходящим среднее. Экссесс представлен как высоковершинными, так и низковершинными кривыми распределения высот.

Средние показатели высоты у ели в сосняках изменяются от 6 до 9 м, что на 2...9 м ниже, чем у сосны. При близком возрасте ели и сосны в сосняках, развивающихся на вырубках, первая значительно уступает второй как по средним, так и по максимальным высотам. Амплитуда колебания высоты ели изменяется от 4,0 до 12,5 м. Варьирование ее высоты составляет от 21 до 50 %. Положительная асимметрия и отрицательный эксцесс указывают на сильно растянутые кривые, отражающие эти значения, и преобладание мелких по высоте деревьев ели. Береза по высотной структуре имеет показатели близкие к этим.

Результаты анализа строения древостоев по высоте указывают на низкие темпы роста в высоту древесных пород, сопутствующих сосне, во всех исследуемых типах сосняков.

Для оценки тесноты связи между диаметром и высотой деревьев в сосняках использовались экспоненциальная и логарифмическая кривые, а также функция Вейбула (табл. 5). Взаимосвязи между диаметром и высотой сосны характеризуются высокими показателями как коэффициентов корреляции ($R = 0,78–0,93$), так и корреляционного отношения ($R = 0,80–0,95$). В старовозрастных сосняках Карелии, по данным С.С. Зябченко [7], корреляционное отношение между диаметром и высотой составляет 0,91. Связи между этими показателями (независимо от типа возрастной структуры) выявлены для среднетаежных сосняков Северного Приуралья [10].

По мере увеличения разновозрастности древостоев связь между размерными показателями деревьев и их возрастом становится более явной [6, 10, 27]. Линейные корреляционные связи между диаметром и возрастом, высотой и возрастом почти во всех типах сосняков изменяются от слабой до значительной ($R = 0,15...0,66$).

Таблица 5

Связь между диаметром на высоте 1,3 м и высотой стволов сосны (при $p \leq 0,05$)

Уравнение	Коэффициенты				R	SE
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		
<i>Зеленомошный (ППП 6) У.Р.</i>						
$H = a + b \ln D$	-6,952	8,2660	–	–	0,83	1,89
$H = a + b \ln D$	8,479	0,4497	–	–	0,82	1,97
<i>Зеленомошный (ППП 11) У.Р.</i>						
$H = a - be^{-cD^d}$	22,632	83,9390	0,3596	0,7059	0,90	1,24
$H = a + bD$	9,833	0,3936	–	–	0,80	1,60
<i>Сфагновый (ППП 17) С.Р.</i>						
$H = a - be^{-cD^d}$	14,789	9,2991	0,004	2,104	0,95	1,02
$H = a + bD$	5,067	0,4103	–	–	0,93	1,13
<i>Сфагновый (ППП 21) С.Р.</i>						
$D = a - be^{-cD^d}$	17,100	21,7580	0,31	0,5111	0,83	1,01
$H = a + bD$	5,476	0,3419	–	–	0,81	1,02
<i>Зеленомошный (ППП 4) У.Р.</i>						
$H = a(1 - \exp^{-bD})$	1,893	0,1071	–	–	0,90	1,44
$H = a + bD$	7,472	0,4670	–	–	0,83	1,64
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 8) У.Р.</i>						
$H = a + b \ln D$	1,480	5,0570	–	–	0,79	1,31
$H = a + bD$	8,398	0,4493	–	–	0,78	1,34
<i>Сфагновый (ППП 15) У.О.</i>						
$H = a - be^{-cD^d}$	14,229	8,9040	0,0009	2,592	0,89	1,19
$H = a + bD$	2,785	0,5280	–	–	0,89	1,18
<i>Чернично-зеленомошный (ППП 19) У.Р.</i>						
$H = a(1 - \exp^{-bD})$	18,652	0,1320	–	–	0,85	1,16
$H = a + bD$	7,231	0,6134	–	–	0,83	1,22

Примечание: R – коэффициент корреляции; SE – стандартная ошибка.

Высокая степень взаимосвязи между диаметром и возрастом отмечается в ступенчато-разновозрастных сосняках сфагновых (ППП 17, 21), где *R* изменяется в пределах 0,79...0,96 (рис. 4).

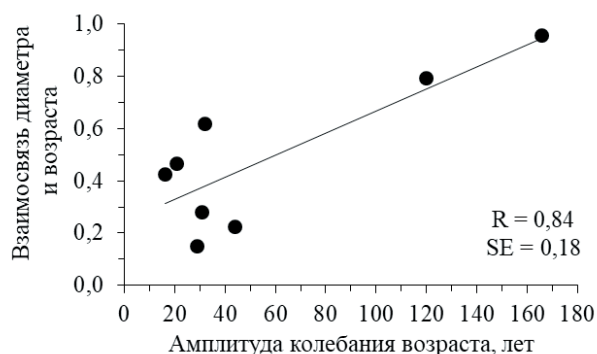
Проведенный статистический анализ показал, что с увеличением амплитуды колебаний возраста деревьев сосны усиливается корреляционная связь диаметра и возраста ($R = 0,84$).

Заключение

Северотаежные сосняки на территории Республики Коми формируют древостой трех типов возрастной структуры: условно-одновозрастные, условно-разновозрастные и ступенчато-разновозрастные. Последние в древостоях развивают

Рис. 4. Связь между амплитудой колебания возраста и корреляционной зависимостью диаметра и возраста в древостоях сосняков

Fig. 4. Relationship between the amplitude of age fluctuations and correlation values of diameter and age in pine stands



от двух до трех отдельных поколений деревьев сосны. Заселение сосны на вырубках с применением палового метода уборки порубочных остатков происходит быстрее, чем в древостоях послепожарного происхождения. Независимо от типа возрастной структуры древостоев, деревья сосны характеризуются высокими показателями вариации диаметра (27,1...39,8 %) и средними показателями вариации высоты (13...27 %). В составе древостоев сосняков при доминировании сосны присутствуют ель, лиственница, береза, осина, которые аккумулируют от 1 до 40 % общего запаса стволовой древесины. Лиственница в древостоях представлена условно-разновозрастным или ступенчато-разновозрастным типом возрастной структуры и формирует до трех обособленных поколений деревьев. Однако колебания возраста лиственницы в поколениях представлены более короткими возрастными циклами, чем у сосны. Ель и береза формируют преимущественно 1 (редко 2) разновозрастное поколение. Проведенный анализ строения по диаметру и высоте древостоев показал, что в условиях северной тайги ростовые процессы у сосны проходят интенсивнее по сравнению с их скоростью у сопутствующих ей древесных пород. Однако, несмотря на относительно быстрые темпы развития древостоев сосны, выявлены достаточно высокие статистические различия в их строении. Для повышения продукционной способности насаждений необходимо проведение рубок ухода (прореживания) в древостоях условно-однообразных, условно-разновозрастных типов возрастной структуры и ступенчато-разновозрастных типов с преобладанием молодого поколения. Результаты анализа строения древостоев на постоянных пробных площадях станут основой для мониторинга динамики развития северотаежных сосновых экосистем в условиях изменяющегося климата и роста антропогенной нагрузки в местах ведения геологоразведки, добычи и транспортировки углеводородного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахтин А.А., Соколов Н.Н. Типы возрастной структуры заболоченных сосняков Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 4. С. 76–86. [Bakhtin A.A., Sokolov N.N. Types of Age Structure of Waterlogged Pine Forests in the Arkhangelsk Region. *Lesnoj Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 4, pp. 76–86]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.4.76](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.4.76); http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/7da/bahtin_types_of_age_structure-.pdf
2. Березовская Ф.С., Кареев Г.П. Моделирование динамики древостоев // Сиб. лесн. журн. 2015. № 3. С. 7–19. [Berezovskaya F.S., Karev G.P. Modeling of Forest Dynamics. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2015, no. 3, pp. 7–19] DOI: [10.15372/SJFS20150302](https://doi.org/10.15372/SJFS20150302)

3. Бобкова К.С., Манов А.В., Осипов В.М., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А., Торлопова Н.В., Федорков А.Л., Комаров А.С., Шанин В.Н., Гончарова Н.Н., Загирова С.В., Михайлов О.А., Мигловец М.Н. Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми. Сыктывкар, 2014. 201 с. [Bobkova K.S., Manov A.V., Osipov V.M., Osipov A.F., Kuznetsov M.A., Torloпова N.V., Fedorkov A.L., Komarov A.S., Shanin V.N., Goncharova N.N., Zagirova S.V., Mikhaylov O.A., Miglovets M.N. *Carbon in Forest and Bog Ecosystems of Specially Protected Natural Areas of the Komi Republic*. Syktyvkar, 2014. 201 p.].
4. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 112 с. [Gusev I.I. *Ecosystem Modeling*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p.].
5. Демаков Ю.П. Структура и закономерности развития лесов Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: Поволж. ГТУ, 2018. 432 с. [Demakov Y.P. *The Structure and Patterns of Forest Development of the Mari El Republic*. Yoshkar-Ola, Volga Tech Publ., 2018. 432 p.].
6. Ермоленко П.М. Сосновые леса Восточного Саяна. Красноярск: ИЛИД, 1987. 148 с. [Ermolenko P.M. *Pine Forests of the Eastern Sayan*. Krasnoyarsk, ILiD Publ., 1987. 148 p.].
7. Зябченко С.С. Сосновые леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1984. 244 с. [Zyabchenko S.S. *Pine Forests of the European North*. Leningrad, Nauka Publ., 1984. 244 p.].
8. Комин Г.Е., Семечкин И.В. Возрастная структура древостоев и принципы ее типизации // Лесоведение. 1970. № 2. С. 24–33. [Komin G.E., Semechkin I.V. Age Structure of Forest Stands and Principles of Its Typing. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1970, no. 2, pp. 24–33].
9. Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 208 с. [Kuz'michev V.V. *Patterns of the Dynamics of Forest Stands: Principles and Models*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 208 p.].
10. Кутявин И.Н. Сосновые леса Северного Приуралья: строение, рост, продуктивность. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 176 с. [Kutyavin I.N. *Pine Forests of the Northern Cis-Urals: Structure, Growth, Productivity*. Syktyvkar, IB FRC Komi SC UB RAS Publ., 2018. 176 p.]. DOI: [10.31140/book-2018-02](https://doi.org/10.31140/book-2018-02)
11. Левин В.И. Сосняки Европейского Севера (строение, рост и таксация древостоев). М.: Лесн. пром-сть, 1966. 152 с. [Levin V.I. *Pine Forests of the European North (Structure, Growth, and Valuation of Stands)*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 152 p.].
12. Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части Российской Федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей, Республики Коми) / отв. сост. Г.С. Войнов, Н.П. Чупров, С.В. Ярославцев. Архангельск: Правда Севера, 2012. 672 с. [Forest Valuation Handbook for the North-East Part of the Russian Federation (Official Materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk and Vologda Regions and Komi Republic). Content by G.S. Voynov, N.P. Chuprov, S.V. Yaroslavtsev. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 2012. 672 p.].
13. Листов А.А. Боры беломошники. М.: Агропромиздат, 1986. 181 с. [Listov A.A. *Lichen Pine Forests*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 181 p.].
14. Львов П.Н., Ипатов Л.Ф., Плохов А.А. Лесообразовательные процессы и их регулирование на Европейском Севере. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 112 с. [L'vov P.N., Ipatov L.F., Plokhov A.A. *Forest-Forming Processes and Their Regulation in the European North*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 112 p.].
15. Мелехов И.С. Рубки и возобновление леса на Севере. Архангельск: Арханг. кн. изд-во, 1960. 201 с. [Melekhov I.S. *Felling and Reforestation in the North*. Arkhangelsk, Arkhangel'skoye knizhnoye izdatel'stvo, 1960. 201 p.].
16. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / под ред. В.В. Загрева, В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусева, А.Г. Мошкалева. М.: Колос, 1992. 495 с.

[*All-Union Standards for Forest Inventory*. Ed. by V.V. Zagreyev, V.I. Sukhikh, A.Z. Shvidenko, N.N. Gusev, A.G. Moshkalev. Moscow, Kolos Publ., 1992. 495 p.].

17. Республика Коми: энциклопедия. Т. 2. Сыктывкар: Коми книж. изд-во, 1999. 573 с. [*Komi Republic: Encyclopedia*. Vol. 2. Syktyvkar, Komi knizhnoye izdatel'stvo, 1999. 573 p.].

18. Рысин Л.П., Вакуров А.Д., Павлов В.Ф. Значение постоянных пробных площадей в лесоводственных исследованиях // Лесоведение. 1981. № 1. С. 60–66. [Rysin L.P., Vakurov A.D., Pavlov V.F. The Value of Permanent Trial Plots in Forestry Research. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1981, no. 1, pp. 60–66].

19. Семенов Б.А., Цветков В.Ф., Чибисов Г.А., Елизаров Ф.П. Притундровые леса европейской части России (природа и ведение хозяйства). Архангельск: Пресс А, 1998. 334 с. [Semenov B.A., Tsvetkov V.F., Chibisov G.A., Elizarov F.P. *Trans-Tundra Forests of the European Part of Russia (Nature and Management)*. Arkhangelsk, Press A Publ., 1998. 334 p.].

20. Стороженко В.Г. Устойчивые лесные сообщества. Теория и эксперимент. Тула: Гриф и К°, 2007. 192 с. [Storozhenko V.G. *Stable Forests Communities. The Theory and Experiment*. Tula, Grif i K Publ., 2007. 192 p.].

21. Цветков В.Ф. Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них. Архангельск: АГТУ, 2002. 380 с. [Tsvetkov V.F. *Pine Forests of the Kola Forest Region and Management in Them*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 380 p.].

22. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Краснер Ф., Онучин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 3–25. [Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Krahner F., Onuchin A.A. Transition to Sustainable Forest Management in Russia: Theoretical and Methodological Backgrounds. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2017, no. 6, pp. 3–25]. DOI: [10.15372/SJFS20170601](https://doi.org/10.15372/SJFS20170601)

23. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. 80 с. [Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdeyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzabayev M.M., Khantemirov R.M. *Methods of Dendrochronology*. Part I. Fundamentals of Dendrochronology. Collection and Obtaining of Tree-Ring Information. Krasnoyarsk, KraSU Publ., 2000. 80 p.].

24. Del Río M., Pretzsch H., Alberdi I., Bielak B., Bravo F., Brunner A. et al. Characterization of the Structure, Dynamics, and Productivity of Mixed-Species Stands: Review and Perspectives. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, iss. 1, pp. 23–49. DOI: [10.1007/s10342-015-0927-6](https://doi.org/10.1007/s10342-015-0927-6)

25. Engelmark O., Kullman L., Bergeron Y. Fire and Age Structure of Scots Pine and Norway Spruce in Northern Sweden during the Past 700 Years. *New Phytologist*, 1994, vol. 126, iss. 1, pp. 163–168. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1994.tb07542.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb07542.x)

26. Garet J., Raulier F., Pothier D., Cumming S.G. Forest Age Class Structures as Indicators of Sustainability in Boreal Forest: Are We Measuring Them Correctly? *Ecological Indicators*, 2012, vol. 23, pp. 202–210. DOI: [10.1016/j.ecolind.2012.03.032](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.032)

27. Kuuluvainen T., Mäki J., Karjalainen L., Lehtonen H. Tree Age Distributions in Old-Growth Forest Sites in Vienansalo Wilderness, Eastern Fennoscandia. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, pp. 169–184. DOI: [10.14214/sf.556](https://doi.org/10.14214/sf.556)

28. Lilja S., Kuuluvainen T. Structure of Old *Pinus sylvestris* Dominated Forest Stands along a Geographic and Human Impact Gradient in Mid-Boreal Fennoscandia. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 3, pp. 407–428. DOI: [10.14214/sf.377](https://doi.org/10.14214/sf.377)

29. Shanin V., Komarov A., Mäkipää R. Tree Species Composition Affects Productivity and Carbon Dynamics of Different Site Types in Boreal Forests. *European Journal of Forest Research*, 2014, vol. 133, iss. 2, pp. 273–286. DOI: [10.1007/s10342-013-0759-1](https://doi.org/10.1007/s10342-013-0759-1)

30. Steijlen I., Zackrisson O. Long-Term Regeneration Dynamics and Successional Trends in a Northern Swedish Coniferous Forest Stand. *Canadian Journal of Botany*, 1987, vol. 65, no. 5, pp. 839–848. DOI: [10.1139/b87-114](https://doi.org/10.1139/b87-114)

31. Stinson G., Kurz W.A., Smyth C.E., Neilson E.T., Dymond C.C., Metsaranta J.M., Boisvenue C., Rampley G.J., Li Q., White T.M., Blain D. An Inventory-Based Analysis of Canada's Managed Forest Carbon Dynamics, 1990 to 2008. *Global Change Biology*, 2011, vol. 17, iss. 6, pp. 2227–2244. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x)

32. Wallenius T. Forest Age Distribution and Traces of Past Fires in a Natural Boreal Landscape Dominated by *Picea abies*. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, pp. 201–211. DOI: [10.14214/sf.558](https://doi.org/10.14214/sf.558)

STAND STRUCTURE OF NORTHERN TAIGA PINE FORESTS

Ivan N. Kutjavin, Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

Aleksey V. Manov, Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

Andrey F. Osipov, Candidate of Biology, Research Scientist; ResearcherID: [P-9583-2015](https://orcid.org/0000-0003-0618-9660),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0618-9660>

Mikhail A. Kuznetsov, Candidate of Biology, Research Scientist; ResearcherID: [P-9870-2015](https://orcid.org/0000-0001-6331-9578),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6331-9578>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, GSP-2, ul. Kommunisticheskaya, 28, Syktyvkar, 167982, Russian Federation; e-mail: kutjavin-ivan@rambler.ru, manov@ib.komisc.ru, osipov@ib.komisc.ru, kuznetsov_ma@ib.komisc.ru

Abstract. In Northern taiga conditions pine forests occupy about 1.8 mln ha of the territory of the Komi Republic and are mainly represented by sphagnum, green-moss and lichen forest types. The studies were carried out at the Zelenoborsk Forest Station of the Institute of Biology of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences in green-moss and sphagnum pine forests developing at the site of fires and clearcuts. Tree layer has a mix composition with the predominance of pine trees and admixture of spruce, birch, larch and aspen. Pine stands form three types of age structure: conventionally even-aged; conventionally uneven-aged, represented by one generation; and stepped uneven-aged, consisting of two or three generations of pine trees. Trees left behind during clearcut and felling residuals at the cutting area by the burn method contribute to the formation of stands of stepped uneven-aged age structure. The variation coefficients of tree age are 5.8–10.8 % in pine forests with one generation and 39.7–45.6 % in forests with two or three generations. The number of generations and the type of age structure had no effect on the diameter and height of trees in the stand, which varied respectively within 25.2–49.5 % and 15.7–27.8 %. In pine forests developing after fires, the peak of pine settlement occur in the second or third decade, while in cutting areas, the maximum renewal occurs in the first or second decade after clearcuts. The amplitude of tree age fluctuations varies from 16 to 33 years in conventionally even-aged and conventionally uneven-aged forests developed after clearcuts and from 30 to 45 years in post-fire stands. In stepped uneven-aged stands tree age fluctuations changes from 120 to 167 years, and from 22 to 66 years in generations. The curves showing the distribution of trees by diameter in stands of pine trees had a left-handed shift, the asymmetry is represented by positive values and varies from 0.05 to 1.03. Trees of associate species are inferior in development, both in diameter and in height to pine trees of similar age.

A close correlation between the diameter and height of trees in the stands was revealed. The relationship of age with diameter and height of trees varies from weak to significant at almost all of the sites studied. A close correlation between age and diameter was found in stepped uneven-aged pine forests ($R = 0.79-0.96$). The correlation between diameter and age increase with an increase in tree age fluctuations amplitude.

For citation: Kutuyavin I.N., Manov A.V., Osipov A.F., Kuznetsov M.A. Stand Structure of Northern Taiga Pine Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 86–105. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-86-105

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment on the topic “Spatial-Temporal Dynamics of the Structure and Productivity of Forest Phytocenoses and Bog Ecosystems in the European North-East of Russia”, No. AAAA-A17-117122090014-8.

Keywords: Northern taiga, pine forests, composition, structure, clearcuts, forest fires.

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

Поступила 10.01.20 / Received on January 10, 2020

УДК 528.856:630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-106-115

АЛГОРИТМ И ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ХАЧМАЗСКОГО РАЙОНА АЗЕРБАЙДЖАНА СРЕДСТВАМИ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В.М. Мамедалиева, канд. геогр. наук; ResearcherID: AAC-5454-2021,

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

Институт экологии Национального аэрокосмического агентства, ул. С.С. Ахундова, д. 1, г. Баку, Азербайджан; e-mail: valide.mamedaliyeva@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты многолетних наблюдений за состоянием лесного покрова Хачмазского р-на Азербайджана. При этом учитывались как результаты дистанционного зондирования Земли, так и данные более старых наблюдений, полученных путем натурного мониторинга и сохраненных в виде тематических карт на бумажных носителях. Результаты дистанционного зондирования содержали мультиспектральные спутниковые изображения за несколько лет. С помощью программы QGIS и плагина Semi-Automatic Classification Plugin проводили предварительную обработку изображений, включающую радиометрическую и атмосферную коррекцию, а также классификацию участков исследуемого района по типу покрытия земной поверхности на основе анализа их спектральных кривых. Согласно классификации определялись площади, занимаемые лесными массивами. В совокупности наблюдений включались данные из имеющихся архивных материалов – тематических карт Хачмазского р-на. Для их обработки и извлечения данных о площади лесных массивов в среде MATLAB разработана программа. Алгоритм программы обработки включает проведение гистограммного анализа изображения в целом и отдельно легенды. По гистограмме легенды определяется число тематических слоев карты, но в их число не включаются слои, содержащие неиспользуемые цвета, обозначающие соседние районы, участки моря и др. Затем проводится цветовая коррекция пикселей изображения (квантование цветов по числу тематических слоев), морфологическая обработка и осуществляется расчет числа пикселей каждого слоя и всех слоев вместе. По полученным соотношениям рассчитывается площадь каждого слоя. Данные обработки архивных материалов вместе с результатами дистанционного зондирования сводятся в общую таблицу, с использованием которой строится диаграмма изменения площади леса, а также модель в виде полинома, отражающего эту динамику. Анализ диаграммы выявил тенденцию к уменьшению площади лесов: за 7 лет – на 21 %. Разработанный алгоритм проводит разбивку тематических карт на отдельные слои в соответствии с цветами легенды.

Для цитирования: Мамедалиева В.М. Алгоритм и оценка изменения площади лесного покрова Хачмазского района Азербайджана средствами космического мониторинга // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 106–115. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-106-115

Ключевые слова: лесной покров, площадь, динамика изменений, Хачмазский р-н, электронные карты, тематический слой, обработка изображений.

Введение

В число приоритетных направлений развития лесной науки входит разработка и применение моделей кратко-, средне- и долгосрочного прогнозирования

динамики лесов в условиях комбинированного действия антропогенных и природных факторов [5]. Ведущими факторами для леса являются тепло и осадки. Проявляется также влияние рельефа, почвы, локальных особенностей климата и др. [4].

Изменение лесов – очень динамичный и непрерывный процесс, имеющий множество аспектов, часто находящийся во взаимодействии и взаимозависимости с другими формами землепользования, производством продовольствия и климатическими системами. Эта сложность до сих пор полностью не изучена [17].

В настоящее время в лесоведении, как и в других областях научных исследований, широкое распространение получили географические информационные системы (ГИС), дающие широкие возможности обработки больших объемов географических данных и позволяющие создавать самые разнообразные тематические слои электронных карт. Однако ГИС существовали не всегда, в архивах и сейчас имеется большое количество созданных вручную различных тематических карт на бумажных носителях. Эти карты содержат ценную информацию, владение которой позволяет оценивать динамику многих процессов, решать другие задачи. Большинство систем мониторинга и сбора данных основаны на сочетании наземных измерительных экспериментов, аэро- или спутниковых наблюдений [18].

Одной из глобальных задач становится оценка состояния лесного покрова – легких Земли. Леса являются важнейшим условием поддержания всей экосистемы на планете, что обуславливает необходимость выработки прогнозных оценок их состояния [1, 21]. Изучение лесного покрова включает не только получение информации о его количестве, особенно важна возможность проведения моделирования. Компьютерные средства позволяют получить модель как функцию от одного или нескольких аргументов, а в качестве исходных данных использовать самые различные источники. Моделирование зависимости площади лесов от антропогенных факторов – одно из приоритетных направлений исследований, поскольку рост населения в последние десятилетия приводит к увеличению масштабов уничтожения лесов [19].

Цель исследования – на примере Хачмазского района Азербайджана изучить динамику изменения лесных массивов с учетом результатов многолетних наблюдений, в том числе данных спутниковых съемок и архивных материалов, представленных в виде табличных данных или тематических карт на бумажных носителях.

Объекты и методы исследования

Хачмазский район – один из северных районов Азербайджана – занимает территорию 1 063 км², граничит с Российской Федерацией, располагаясь на западном побережье Каспийского моря, севернее хребта Большой Кавказ. Ландшафт района включает горные, равнинные и низменные участки и следующие природные зоны: лес, степь, пустыню. Развито сельское хозяйство [6, 7].

Для исследования использовались тематические карты, сделанные в 1987 и 2011 гг. Путем сканирования они переводились в электронный формат и сохранялись отдельными файлами в виде рисунков с расширением jpg. На картах различными цветами помечены участки земли, занимаемые лесами,

сельскохозяйственными культурами и др. Прилагались «легенды», т. е. пояснения, каким цветам соответствуют различные типы земельных участков. Требовалось определить площадь, занимаемую их различными типами. С этой целью была разработана специальная программа в среде MATLAB, использовались функции набора инструментов для обработки изображений Image Processing Toolbox [15]. На рис. 1 приводится алгоритм работы программы.



Рис. 1. Алгоритм работы программы

Fig. 1. Program operation algorithm

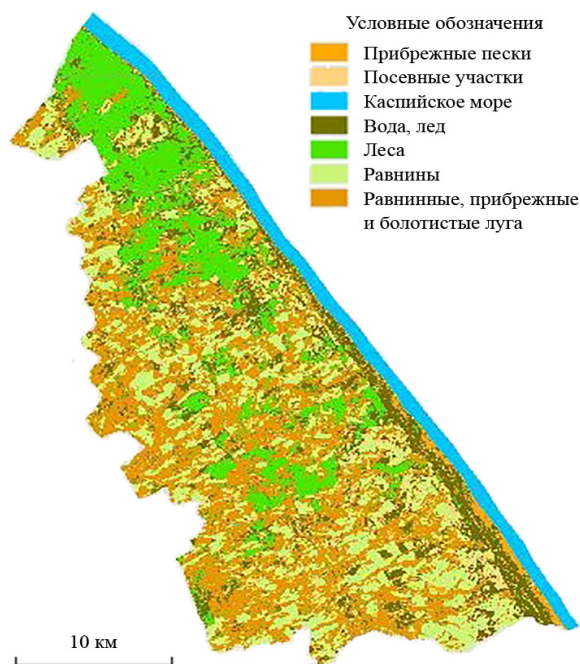
Работу программы поясним на примере обработки файла с изображением тематической карты Хачмазского р-на, созданной в 1987 г. (рис. 2).

Согласно легенде, на карте представлено 6 различных типов земельных участков, а также полоса моря. Кроме того, на изображении присутствовал фон, показывающий соседние с Хачмазским р-ном земли, т. е. всего 8 цветов, из которых нас интересовал цвет участков, занимаемых лесными массивами. Перед обработкой рисунок с изображением карты разделили на два, оставив в первом из них только ту часть, где показан Хачмазский р-н, а во втором – только ту, которая содержала легенду. Все остальное удалили. Такой прием позволил увеличить скорость обработки и одновременно уменьшить необходимый для работы программы объем памяти.

В первую очередь были определены RGB-составляющие всех цветов легенды. Цветное изображение формируется комбинацией трех цветовых состав-

Рис. 2. Тематическая карта
Хачмазского р-на 1987 г.

Fig. 2. Thematic map of the
Khachmaz region, 1987



ляющих, или каналов, – красного (R), зеленого (G) и синего (B). Таким образом, цвет каждого пикселя изображения можно передать набором из трех значений, каждое из которых изменяется от 0 до 255 и определяется автоматически с помощью функций набора инструментов Image Processing Toolbox в среде программы MATLAB. Каждому элементу легенды соответствует свой набор RGB. Например, в рассматриваемом изображении, согласно легенде, цвет лесных участков – (77, 230, 0), а цвет морских – (1, 197, 255).

Изученные нами карты довольно долго хранились в архивах. За это время некоторые части выцвели, сами карты «потерлись». Это привело к изменениям их исходного цвета. Чтобы определить степень искажений, для каждого цветового канала были отдельно построены гистограммы. Они в графическом виде показывают зависимость количества пикселей с одинаковым цветом на всем изображении от значения этого цвета. На рис. 3 приведены гистограммы трех каналов (R, G и B). На горизонтальной оси показана яркость пикселя, а на вертикальной оси – количество пикселей с одинаковой яркостью ($\times 10^5$).

Если взять современную электронную карту, созданную в ГИС, и построить гистограмму любого тематического слоя, то она будет состоять из определенного числа пиков различной высоты, которое не будет превышать число элементов легенды. В нашем же случае число основных цветов равно 8, в то время как гистограммы показывают наличие гораздо большего числа различных оттенков. Для коррекции изображения было решено в каждом канале создать некоторое число диапазонов, в которые бы вошли пиксели с близкими значениями интенсивности цвета. Число этих диапазонов и их границы определялись с помощью гистограмм.

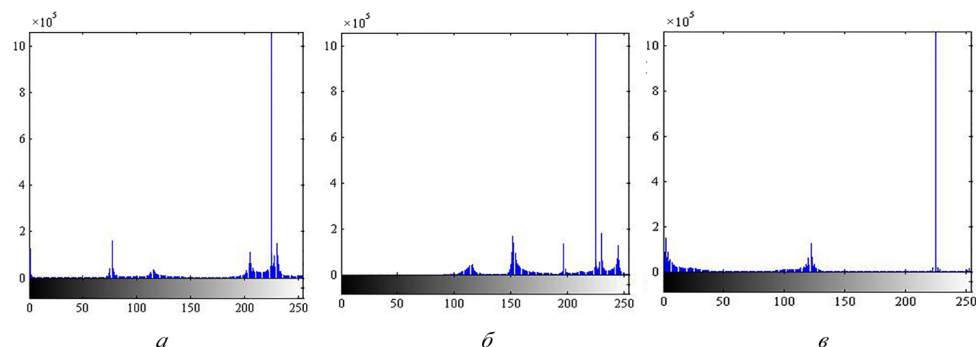


Рис. 3. Гистограммы изображения: *a* – канал R; *б* – канал G; *в* – канал B

Fig. 3. Image histograms: *a* – channel R; *б* – channel G; *в* – channel B

Так, в нашем случае гистограммы отдельных каналов имели соответственно 6, 7 и 3 пика. В соответствии с их числом программа разделила каждую гистограмму на такое же число диапазонов так, чтобы каждый пик оказался внутри отдельного промежутка. Вместе эти диапазоны охватывали значения интенсивностей цвета от 0 до 255. Затем каждому пикселю изображения были поставлены в соответствие номера диапазонов RGB каналов, в которые он попал. Другими словами, была проведена операция квантования каждого канала изображения по определенным с помощью гистограмм диапазонам, в результате чего каждому пикселю был присвоен набор из трех индексов. Аналогичные операции были проделаны со всеми элементами легенды карты, т. е. все цвета легенды также получили свои наборы из трех индексов. Например, в данном изображении пикселям слоя моря присвоили значение (1, 4, 3), а пикселям слоя лесных участков – (2, 6, 1). На основе этих наборов стало возможно отнести каждый из пикселей изображения к своему тематическому слою, включая и слой фона. На рис. 4, *a* приведено изображение полученного тематического слоя лесного массива Хачмазского р-на 1987 г., представляющее собой бинарное изображение.

Для удаления случайного шума полученные слои были морфологически обработаны и очищены от объектов величиной не более 2 пикселей. При этом изменение площади каждого из тематических слоев составило не более 3 %.

Расчет площади каждого из слоев проводился следующим образом. Сначала определялось общее количество пикселей изображения, из которого вычиталось число пикселей фона, а также число пикселей слоя моря. Так было найдено число пикселей изображения, соответствующего площади всего Хачмазского р-на. Затем для каждого из оставшихся слоев число пикселей этого слоя делили на число пикселей всего района и получали значения площадей, занимаемых различными участками, в процентах к площади самого района.

Аналогичной обработке подверглась тематическая карта района, созданная в 2011 г. Бинарное изображение слоя лесного массива за данный год приведено на рис. 4, *б*.

После этого вышеуказанные спутниковые изображения были введены в программу QGIS, свободно распространяемую ГИС с открытым кодом. Для классификации участков земной поверхности с разными типами покрытия был применен модуль Semi-Automatic Classification Plugin [3, 12], который для классификации использует анализ спектральных кривых. Спектральная кривая представляет собой матрицу полученных в разных спектральных каналах

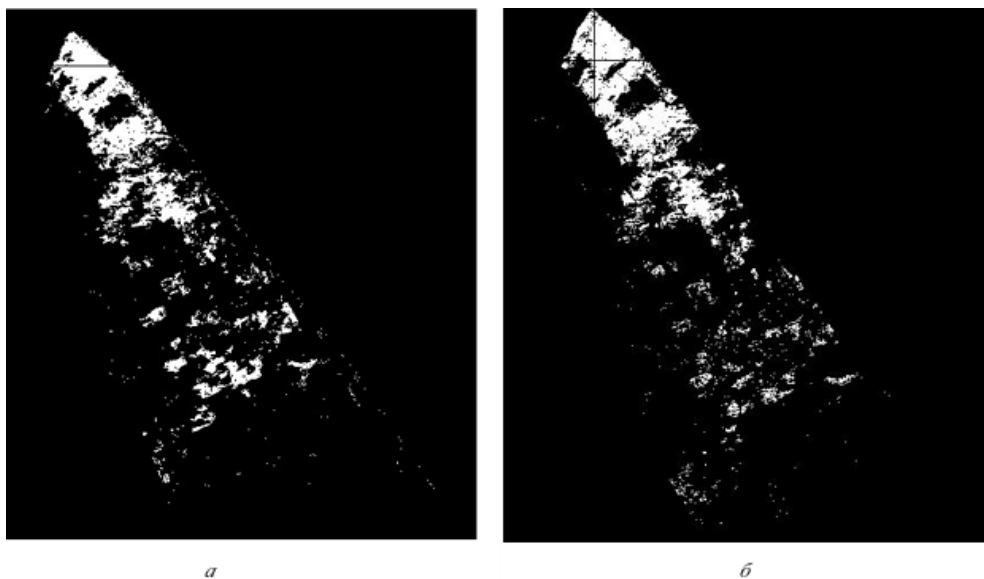


Рис. 4. Полученные тематические слои лесных массивов: *а* – 1987 г.; *б* – 2011 г.

Fig. 4. The resulting thematic layers of forests: *a* – 1987; *b* – 2011

коэффициентов отражения участков земной поверхности со схожими типами покрытия. Анализ спектральных кривых дает возможность классифицировать не только базовые типы (растительность, голая почва, вода, сооружения), но и с помощью тонкой настройки определять и другие типы [11, 16]. С использованием этого же модуля проведена предварительная обработка спутниковых данных, включая радиометрическую калибровку и атмосферную коррекцию [20].

Поскольку этих данных оказалось недостаточно для моделирования, их объединяли с данными космических съемок, полученными с помощью спутников Landsat-5 (1987 и 2000 г.) и Landsat-8 (2018 г.), а также производили усреднение данных.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 приведены данные расчета площадей участков земной поверхности с разными типами покрытия для карт 1987 и 2011 гг.

Таблица 1

Результаты обработки тематических карт 1987 и 2011 гг.

Площадь тематического слоя, км ²	1987 г.	2011 г.
Лесной массив	156,9	180,7
Сельскохозяйственные угодья	82,3	233,0
Пески	123,3	124,6

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что увеличились площади, занимаемые лесами и сельскохозяйственными угодьями, размер площади других участков изменился незначительно. Погрешность вычисления складывалась из погрешностей сканирования, классификатора и морфологической обработки [13] и составила около 15 %.

Для определения динамики изменения площади лесного покрова были добавлены данные дистанционного зондирования спутников Landsat-5 и Landsat-8. В анализе использовались спутниковые снимки от 29 августа 1987 г., 31 июля 2000 г. и 1 июля 2018 г., полученные с помощью сайта организации United States Geo Survey [22].

Все данные, архивные и спутниковые, помещены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для изучения динамики лесного покрова

Год	Площадь лесов, км ²		
	Архив	Landsat-5/-8	Сводные данные
1987	156,9	–	156,9
1987	–	185,6	185,6
2000	–	182,0	182,0
2011	180,7	–	180,7
2018	–	142,5	142,5

При этом проявляется тенденция к сокращению общей площади лесного покрова.

На рис. 5 приведена динамика площади лесного покрова Хачмазского р-на, где сплошной линией показан график, построенный по данным табл. 2 (за 1987 г. взято среднее значение), штрих-пунктирной – значения модели, пунктирной – тренд. Модель создана с помощью программы, разработанной в среде MATLAB [9].

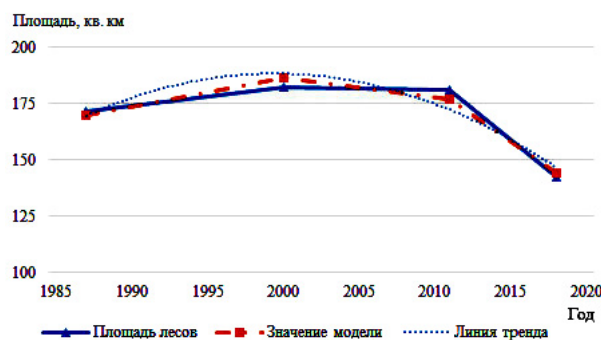


Рис. 5. Изменение площади лесного покрова Хачмазского р-на

Fig. 5. Changes in the area of the Khachmaz region forest cover

Программа для расчета модели использует метод группового учета аргументов [14]. Модель рассчитывается за несколько итераций. С каждой итерацией точность модели повышается. В рассматриваемом случае погрешность моделирования составила менее 1 %.

Тренд рассчитан с помощью программы Excel. Полиномиальный тренд позволяет делать кратко- или среднесрочные прогнозы, имеет тенденцию к цикличности. Цикличность движения свойств лесных организмов не только по отдельности, но и их экосистем в целом подтверждается исследователями [2, 10] и др. При этом жизненные циклы организмов не фиксированы жестко, а пластичны и зависят от взаимодействия организмов со средой их обитания [8]. Только за 7 лет (2011–2018 гг.) уменьшение площади лесов составило 21 %.

Выводы

1. Используемые для моделирования состояния лесного покрова данные спутниковых изображений, а также архивных тематических карт позволили выявить определенную цикличность в изменении площади лесного массива и общую тенденцию к ее сокращению.

2. Для обработки архивных карт был разработан алгоритм, который позволяет быстро и эффективно провести разбивку любых тематических карт, представленных изображениями (в том числе зашумленными и неидеальными), на отдельные тематические слои с точки зрения соответствия цветам легенды. Увеличение разрешения сканирования и правильный подбор параметров морфологической обработки повышают точность метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ализاده Э.К., Гулиева Ф.Э. Метод оценки воздействия антропогенного фактора на лесной покров в горных зонах // Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та. 2016. № 3(137). С. 84–90. [Alizade E.K., Guliyeva F.E. The Method to Evaluate the Anthropogenic Factor Impact on Forest Cover in Mountainous Areas. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2016, no. 3(137), pp. 84–90].

2. Бегон М., Харпер Дж., Таунсенд К. Экология. Особи, популяции и сообщества. Т. 2. М.: Мир, 1989. 477 с. [Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. *Ecology: From Individuals to Ecosystems*. Vol. 2. Moscow, Mir Publ., 1989. 477 p.].

3. Инструментарий QGIS для полуавтоматической классификации земель сельскохозяйственного возделывания по данным КА Sentinel. Режим доступа: <https://www.tvis.com.ua/ru/news/semi-automatic-classification-plugin> (дата обращения 19.06.2020). [QGIS Toolkit for Semi-Automatic Classification of Agricultural Land according to Sentinel Spacecraft Data].

4. Луганский Н.А., Залесов С.В., Луганский В.Н. Лесоведение. Екатеринбург: УГЛТУ. 2010. 432 с. [Luganskiy N.A., Zalesov S.V., Luganskiy V.N. *Forest Science*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2010. 432 p.].

5. Лукина Н.В., Исаев А.С., Крышень А.М., Онучин А.А., Сирин А.А., Гагарин Ю.Н., Барталев С.А. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами // Лесоведение. 2015. № 4. С. 243–254. [Lukina N.V., Isaev A.S., Kryshen' A.M., Onuchin A.A., Sirin A.A., Gagarin Yu.N., Bartalev S.A. Research Priorities in Forest Science – the Basis of Sustainable Forest Management. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 4, pp. 243–254].

6. Мусейбов М.А. Ландшафты Азербайджанской Республики. Баку: БГУ. 2003. 151 с. [Museibov M.A. *Landscapes of the Republic of Azerbaijan*. Baku, BSU Publ., 2003. 151 p.].

7. Прилипко Л.И. Растительный покров Азербайджана. Баку: Элм, 1970. 168 с. [Prilipko L.I. *Vegetation Cover of Azerbaijan*. Baku, Elm Publ., 1970. 168 p.].

8. Проскуряков М.А. Проблема хронобиологической цикличности движения свойств лесных экосистем // Сиб. лесн. журн. 2015. № 2. С. 71–84. [Proskuryakov M.A. Problem of Chronobiological Cyclic of Movement of Forest Ecosystems Properties. First Communication. *Sibirskij Lesnoj Zurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2015, no. 2, pp. 71–84]. DOI: [10.15372/SJFS20150206](https://doi.org/10.15372/SJFS20150206)

9. Сулейманов Т.И., Мустафазаде Н.Х., Гулузаде Р.К. Обработка данных мониторинга атмосферных загрязнений города Баку // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 10. С. 41–45. [Suleymanov T.I., Mustafazade N.Kh., Guluzade R.K. The Data Processing of Air Pollution Monitoring in Baku City. *Pribory i sistemy*.

Upravleniye, kontrol', diagnostika [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2016, no. 10, pp. 41–45].

10. Чистик О.В., Головатый С.Е., Позняк С.С. Общая и радиационная экология // Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2012. 313 с. [Chistik O.V., Golovatyy S.E., Poznyak S.S. *General and Radiation Ecology*. Minsk, ISEI BSU Publ., 2012. 313 p.].

11. Campbell J., Wynne R.H. *Introduction to Remote Sensing*. New York, Guilford Press, 2011. 667 p.

12. Congedo L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Release 6.4.0.2. 2020. 239 p. Available at: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5302121/mod_resource/content/1/SCP_manual.pdf (accessed 14.02.20).

13. Gomasasca M.A. *Basics of Geomatics*. Dordrecht, Springer, 2009. 656 p. DOI: [10.1007/978-1-4020-9014-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9014-1)

14. *Group Method of Data Handling*. Available at: <https://www.gmdh.net> (accessed 09.06.16).

15. *Image Processing Toolbox Documentation – MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/images> (accessed 08.12.19).

16. Jensen J.R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. New Jersey, Prentice Hall, 2004. 526 p.

17. Knoke T. Shades of Forest Change. *Book of Abstracts of an International Conference of IUFRO Unit 4.02.00 on Forest Cover Change, Freising, Germany, April 2–4, 2014*. Freising, IUFRO, 2014, p. 3.

18. Manfreda S., McCabe M., Miller P., Lucas R., Madrigal V.P., Mallinis G. et al. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 4, art. 641. DOI: [10.3390/rs10040641](https://doi.org/10.3390/rs10040641)

19. Pahari K., Murai Sh. Modeling for Prediction of Global Deforestation Based on the Growth of Human Population. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, vol. 54, iss. 5-6, pp. 317–324.

20. *Radiometric Calibration*. L3 Harris Geospatial Documentation Center. Available at: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/RadiometricCalibration.html> (accessed 17.12.19).

21. *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).

22. *United States Geological Survey*. Available at: <https://www.usgs.gov> (accessed 30.08.19).

ALGORITHM AND MEASUREMENT OF FOREST COVER AREA CHANGE IN THE KHACHMAZ REGION OF AZERBAIJAN BY SATELLITE MONITORING

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, Azerbaijan National Aerospace Agency, ul. S.S. Akhundova, 1, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: valide.mamedaliyeva@mail.ru

Abstract. The article presents the results of long-term observations of the forest cover state in the Khachmaz region of Azerbaijan. Both the results of Earth's remote sensing and the data of earlier observations carried out by field monitoring were used in the study. The earlier data was stored in the form of thematic maps on paper. The results of remote sensing contained multispectral satellite images obtained over several years. Image processing was performed using the QGIS program and the Semi-Automatic Classification Plugin. The processing included radiometric and atmospheric correction, as well as classification of the study area by the type of land surface coverage. Classification was performed on the

basis of the spectral curves analysis in various sections of the region. The areas occupied by forests were determined based on the classification. The set of observations included data from the available archival materials – thematic maps of the Khachmaz region. A software in MATLAB was developed for processing the maps and calculating the area of forests. The program operation algorithm includes histogram analysis of the image as a whole and separately of the legend. The histogram of the legend determines the number of thematic layers of the map. They do not include layers containing unused colors, such as the colors of neighboring areas, sections of the sea, etc. Then color correction of image pixels is performed, namely, quantization of colors according to the number of specific thematic layers. Later on, morphological processing of each layer is carried out. Areas containing less than the specified number of pixels are assigned the color of the surrounding layer. The number of pixels of each layer and all layers are calculated. Finally, the obtained ratios are used to calculate the area of each layer. The data of processing of archival materials together with the results of remote sensing are summarized in a joint table. According to the table, a diagram of changes in the forest area is constructed, as well as a model in the form of a polynomial showing this dynamics. The diagram analysis revealed a tendency to a decrease in the area of forests. The forest area has decreased by 21 % for 7 years. The developed algorithm splits thematic maps into separate layers in accordance with the colors of the legend.

For citation: Mamedaliyeva V.M. Algorithm and Measurement of Forest Cover Area Change in the Khachmaz Region of Azerbaijan by Satellite Monitoring. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 106–115. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-106-115

Keywords: forest cover, area, dynamics of changes, Khachmaz region, electronic maps, thematic layer, image processing.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

The author declare that there is no conflict of interest

Поступила 28.03.20 / Received on March 28, 2020



УДК 625.8:630

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-116-129

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЕСНОГО СОРТИМЕНТОПОДБОРЩИКА

С.М. Базаров¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAW-5363-2020](https://orcid.org/0000-0003-1605-5834),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Ю.И. Беленький¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAХ-2680-2020](https://orcid.org/0000-0002-4170-3664),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>

С.А. Узрюмов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

Ф.В. Свойкин¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

В.Ф. Свойкин², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: s.bazarow@yandex.ru, 2000zalom@gmail.com, ugr-s@yandex.ru, svoikin_fv@mail.ru

²Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Россия, 167982; e-mail: svoikinvf@mail.ru

Аннотация. Одним из перспективных направлений повышения производительности в лесозаготовительном производстве является системный подход к уточнению технологической эффективности колесного сортиментоподборщика на основе построения единой технологической связности всех выполняемых операций от первой «загрузка» до конечной «начало разгрузки». Применение системного анализа при оценке парка лесозаготовительной техники или его элементов позволяет формировать связные и гибкие технологические процессы как единые пространственно-временные производственные структуры. В основе единой связности выполняемых дискретных операций (движение машины по волоку от пачки к пачке, установка манипулятора в рабочее положение, перемещение захвата в сторону сортимента, захват сортимента на земле, его сортировка, выравнивание пачки, перемещение пачки в грузовой отсек, укладка сортимента в грузовой отсек, установка манипулятора в транспортное положение, движение по волоку) с позиции теории систем лежат представление функционального времени производства единицы продукции (1 м³ древесины) операцией и его суперпозиция по всем производственным операциям. Суперпозиция выстраивает единое функциональное время целостности (интегрированности) выполняемых операций, в котором эффективно осуществляется целевая функция производственной структуры. С позиции системного анализа проведено аналитическое исследование определения эффективной производительности в функциональном времени производственного процесса колесного сортиментоподборщика. В статье изучен хронометраж работы колесного сортиментоподборщика Ponsse Buffalo в наиболее типичных природно-производственных условиях арендной базы АО «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» (средняя тайга, Республика

Коми). Предложена методика расчета общей производительности колесного сортиментоподборщика при выполнении всех операций (загрузки, складирования, транспортировки до места разгрузки). Показана возможность применения предложенной методики для оценки эффективности работы колесных сортиментоподборщиков в части реализации прогнозирования общей производительности лесной машины в функциональном времени производства единицы продукции. Методика позволяет выбрать направления повышения производительности труда за счет синхронизации функционального времени выполнения всех производственных операций.

Для цитирования: Базаров С.М., Беленький Ю.И., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф. Системный анализ технологической эффективности колесного сортиментоподборщика // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 116–129. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-116-129

Ключевые слова: колесный сортиментоподборщик, системный анализ, технологическая эффективность, технологические операции, функциональное время, производительность.

Введение

В настоящее время колесный сортиментоподборщик (КС) – основная лесная машина для первичной вывозки древесины при сортиментной заготовке как в Европейском союзе, особенно в Скандинавских странах [13–18, 20, 21], так и в России [1, 6, 7].

Аналізу технологической эффективности КС посвящен ряд работ [8, 11, 12], однако на данный момент вопрос технологической эффективности КС с позиции системного анализа раскрыт и исследован недостаточно.

В связи с потребностью ритмичных поставок древесины потребителю и отсутствием традиционных сезонов ее заготовки по климатическим факторам [10], вопрос системного анализа технологической эффективности КС становится актуальным.

Стоит отметить, что попытки систематизировать анализ технологического процесса парка лесозаготовительной техники для улучшения общей эффективности фазы технологии процесса лесозаготовок постоянно предпринимаются ведущими фирмами-производителями отрасли: разрабатываются и систематически внедряются программы передачи данных с лесозаготовительных машин напрямую потребителю с возможностью последующего анализа. Примерами могут служить TimberOffice™ Data Transfer (TODT) от John Deere, MaxiFleet™ от Komatsu Forest, Opti Progress Control™ от Ponsse, Dasa 5™ от Ferronordic. Активное внедрение в России этих систем иностранными компаниями на данный момент затруднено или невозможно из-за ряда факторов. Многие программы, например MaxiS от Komatsu Forest, зачастую являются дополнительным дорогостоящим программным обеспечением и обладают сложным для восприятия и интерпретации интерфейсом, применяют неадаптированные для нашей страны алгоритмы, при этом отсутствует межплатформенность их использования. Это открывает возможность реализации математического аппарата системного анализа технологической эффективности парка лесных машин (в том числе КС) в межплатформенном программном обеспечении отечественного производства.

Для повышения производительности труда путем цифровизации транспортно-погрузочных операций и увеличения скорости их выполнения необходим переход к более детальному раскрытию динамики пространственно-временной структуры представления технологического процесса: переход от среднестатистической математической модели к рассмотрению пространственно-временной структуры с позиции системного анализа. Это приводит к изменению среднестатистической параметрической оценки производительности на раскрытие состояния функционального пространства–времени, в котором происходят динамически связанные подоперации (к чему уже технически готовы современные аппаратные решатели многооперационных лесозаготовительных машин).

Целью исследования является повышение производительности труда на основе более информативного описания производственного процесса путем раскрытия дифференциально-интегрированной картины единого функционального пространства–времени протекания операции «загрузка» КС как системы связанных подопераций для последующей оценки возможности реализации полученных результатов в унифицированном межплатформенном программном обеспечении для сокращения времени перемещения лесоматериалов от места валки к погрузочному пункту.

Следуя традиционным понятиям формирования процесса [3], системный подход к повышению общей эффективности работы лесозаготовительной техники (в частности КС) является актуальным не только для комплексов лесных машин, но и для их отдельных операций. При этом на данный момент предполагается замена среднестатистической оценки операций более информационно насыщенной картиной их глубокой интегрированной связности. Математический аппарат системного анализа [3] технологической эффективности КС приводит к необходимости связать дифференцированный и интегрированный анализы от начальной подоперации «загрузка» до конечной «разгрузка» в единую динамическую картину технологического процесса.

Объекты и методы исследования

В настоящее время расчет производится согласно среднестатистическому представлению о протекании технологического процесса. Для повышения производительности труда необходим переход к более детальному раскрытию динамики пространственно-временной структуры процесса. Используем формулу часовой производительности КС ($\Pi_{\text{ч}}$, м³/ч) [5, 9]:

$$\Pi_{\text{ч}} = \frac{3600V_{\text{п}}\varphi_2}{T_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где 3600 – множитель для перевода производительности в часы; $V_{\text{п}}$ – объем пачки сортиментов, м³; φ_2 – коэффициент использования расчетного объема пачки сортиментов (0,8...0,9); $T_{\text{ц}}$ – время цикла трелевки пачки сортиментов, с.

Время цикла трелевки пачки леса согласно среднестатистическому представлению о протекании технологического процесса [5, 9]:

$$T_{\text{ц}} = T_A + T_B + T_C + \dots + T_I + T_K + T_n,$$

где $T_A, T_B, T_C, \dots, T_I, T_K, T_n$ – время погрузки пачки сортиментов в грузовой отсек, с; A, B, C, \dots, I, K, n – индексы соответствующей подоперации.

Время погрузки пачки сортимента:

$$T_n = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + \dots + p_n,$$

где p_1, \dots, p_n – время технологических операций, с.

Время технологических операций:

$$p_n = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10},$$

где t_1 – движение машины по волоку от пачки к пачке, с; t_2 – установка манипулятора в рабочее положение, с; t_3 – перемещение захвата в сторону сортимента, с; t_4 – захват сортимента на земле, с; t_5 – сортировка сортимента, с; t_6 – выравнивание пачки, с; t_7 – перемещение пачки в грузовой отсек, с; t_8 – укладка сортимента в грузовой отсек, с; t_9 – установка манипулятора в транспортное положение, с; t_{10} – движение по волоку, с.

На практике количественные показатели схем разработок лесосек определяются конкретными условиями. В зависимости от лесорастительных условий применяется технология, соответствующая установленному способу рубок и трелевки древесины, среднему объему хлыста, запасу древесины на лесосеке, принятой технологии лесосечных работ, схеме размещения волоков, лесовозных дорог, усов, погрузочных пунктов, стоянок машин, объектов обслуживания, площади, на которой должны быть сохранены подрост и тонкомер и процент их сохранности, состоянию почвы. Важным фактором, определяющим количественные показатели, является не только выбор комплекса лесных машин, но и оптимизация их функциональной связанности с позиции системного анализа.

Оптимизация работы [2, 4] зависит от синхронизации операций в функциональном пространстве–времени комплекса, определяемого целевой функцией, выстраивающей функциональное пространство времени связности технологических операций как единый интегрированный процесс [3].

В ходе эксперимента произведен хронометраж работы КС Ponsse Buffalo 8W [19, 22]. Данные были собраны в процессе работы лесной машины на Бортомском участке Южного отделения АО «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» в квартале № 561, на делянке № 3 Куратовского участкового лесничества в средней тайге Республики Коми. Исследования проводились в смешанном елово-березовом лесу (породный состав 4Е4Б1С1П); тип леса – черничный; обоснование выбора условий: наиболее типичные природно-производственные условия арендной базы предприятия.

При изучении основных параметров КС учитывают производительность технологической линии лесных машин и качество сортировки вырабатываемых сортиментов (выход деловой древесины). В транспортных задачах на передний план выходит производительность, определяемая выбранными схемами работ и системой машин. Конкретными характеристиками изучаемого процесса в зависимости от решаемых задач могут быть: загрузка машин по времени, вероятность их простоя по различным причинам, объем транспортной работы, процент выхода определенных лесоматериалов, доля отходов и др.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно формуле (1) работа КС определяется множеством дискретных операций, характеризующихся временем их выполнения. Сортименты могут

также в процессе обработки сортироваться на пасеке. Технологическая схема работы колесного сортиментоподборщика при проведении исследований (порядок и направление сортировки и укладки сортиментов в грузовой отсек) представлена на рис. 1.

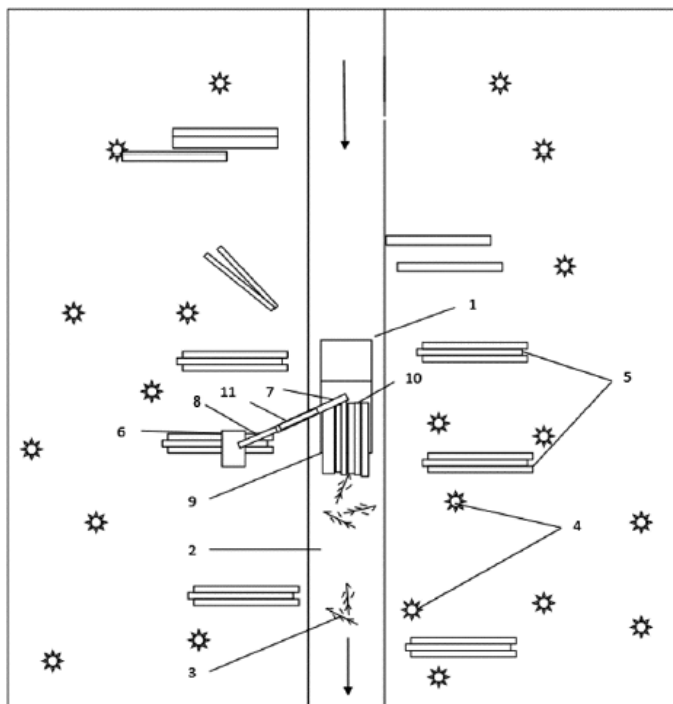


Рис. 1. Схема работы колесного сортиментоподборщика: 1 – колесный сортиментоподборщик; 2 – волок; 3 – порубочные остатки; 4 – подсад; 5 – сортимент; 6 – грейферный захват; 7 – стрела; 8 – телескопическое звено; 9 – грузовой отсек; 10 – защитная перегородка; 11 – рукоять

Fig. 1. Operation diagram of the wheeled forwarder: 1 – wheeled forwarder; 2 – skidding track; 3 – felling residues; 4 – undergrowth; 5 – timber assortments; 6 – grapple tong; 7 – hinge boom; 8 – boom; 9 – cargo compartment; 10 – protective shield; 11 – dipper stick

КС движется в направлении указательной стрелки по прорубленному валочно-сучкорезно-раскряжевочной машиной (ВСРМ) пасечному волоку.

Перемещая захват манипулятора 6 в требуемом направлении, используя движения подъема стрелы, телескопического звена стрелы и поворота колонны манипулятора и одновременно поворачивая захват в положение, необходимое для загрузки, КС осуществляет захват сортиментов из средней части пачки. При этом между челюстями грейфера и сортиментами нужно оставлять свободное пространство, которое обеспечивается вывешиванием захвата на небольшом расстоянии от штабеля сортиментов. Необходимо следить за тем, чтобы в механизм не попадали лесосечные отходы. Следует одновременно захваты-

вать и поднимать пачку сортиментов. Для перемещения груза на КС используется движение поворота колонны манипулятора и подъема его стрелы. При выполнении этой операции требуется оставлять свободное пространство между сортиментами и стойками грузового отсека, равное приблизительно 0,5 м. При необходимости на этом этапе можно использовать «телескоп» δ . Во время переноса сортиментов в грузовой отсек их поворачивают до тех пор, пока тот конец пачки сортиментов, который будет уложен к защитной перегородке, не будет нацелен на основание манипулятора. Уже завершая перемещение пачки над грузовым отсеком, следует с помощью рукояти стрелы начинать перемещать сортименты по направлению к защитной перегородке. Благодаря этому приему, движение будет более плавным. Необходимо стремиться переносить сортименты в нужное место без остановки. Укладывают сортименты у стоек или, при наличии свободного пространства, по центру грузового отсека. Сортименты должны лежать вдоль, а их концы располагаться у защитного экрана. Если сортименты были тщательно погружены на лесосеке, то их будет легко штабелировать на площадке складирования и хранения лесоматериалов. При укладке сортиментов на грузовой отсек необходимо раскрывать захват медленно, одновременно поднимая его. Это поможет не допустить укладки сортиментов крест-накрест. Если концы сортиментов, удерживаемые захватом, не выровнены, то можно слегка стукнуть пачкой о защитный экран, убедившись, что пачка находится в горизонтальном положении. Необходимо удерживать захват немного выше лежащих сортиментов. Стоит раскрывать его немного, прежде чем концы сортиментов коснутся экрана, и подтягивать пачку движением рукояти стрелы. Обычно этого движения достаточно, чтобы выровнять концы большинства сортиментов. Часто перед окончанием процесса выравнивания оператор не прерывает движение рукояти стрелы в направлении защитного экрана, что позволяет продолжить выравнивание, быстро раскрыв и закрыв захват.

Стоит отметить, что операторы-профессионалы, имеющие большой опыт работы на КС, выравнивают концы сортиментов, не прерывая движения манипулятора. При погрузке завершающих сортиментов в грузовой отсек необходимо поместить эту пачку по центру, не раскрывая захват. При перемещении КС требуется следить за тем, чтобы захват манипулятора не касался гусениц противоскольжения или колесного оборудования. Сразу после заполнения грузового отсека необходимо надежно зафиксировать захват в задней части грузового отсека. Это гарантирует, что манипулятор не начнет перемещаться, даже если КС передвигается по пересеченной местности. Более того, центр тяжести лесной машины займет самое низкое из возможных положений.

В зависимости от лесоматериала, лежащего на пасеке, захватываются или все сортименты (вся пачка), или только лесоматериал определенного сорта. После захвата сортимент с пасеки подтаскивается с помощью телескопа (если это необходимо) к КС с таким расчетом, чтобы в процессе работы грузоподъемная сила крана соответствовала тоннажу поднимаемого леса. После этого пачка сортиментов перемещается в грузовой отсек.

На основании совокупности данных о множестве остановок КС и выполняемых на каждой остановке технологических операциях, описанных выше, была построена схема затрат времени КС (рис. 2), которая отражает взаимосвязь производственных операций.

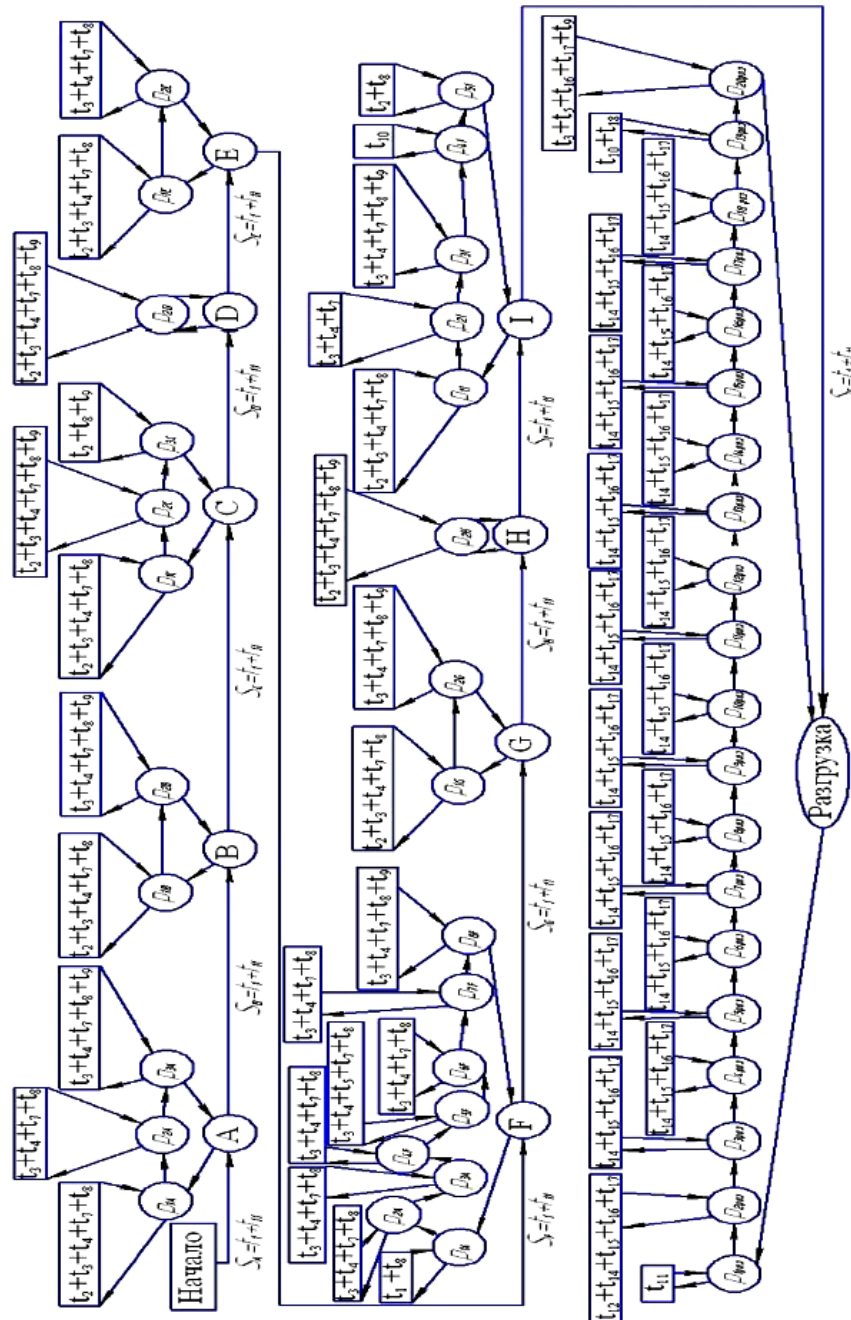


Рис. 2. Схема перемещения по лесосеке и затраты времени и затраты колесного сортировподборщика
 Fig. 2. Diagram of movement along the cutting area and time consumption of the wheeled forwarder

Представленная на рис. 2 дискретная схема производственных операций описывает позиции КС и количество выполняемых им операций.

Для дальнейших расчетов введем следующие обозначения: Π_{ij} – производительность КС на i -й стоянке при выполнении j -й операции на этой стоянке: $i = A, B, C, \dots, I$ – номер стоянки, $j = 1-8$ – количество операций на стоянке.

Пренебрежем значением перевода производительности в часы 3600 и коэффициентом использования рабочего времени ϕ_2 для построения аналитической модели производительности.

С учетом введенных обозначений производительность операций загрузки принимает следующий вид:

$$\Pi_{ij} = \frac{V_{ij}}{t_{ij}}. \quad (2)$$

Как следует из рис. 2, на стоянке A (C) КС выполняет 3 операции. Определяем производительность каждой из них (Π_{A1} , Π_{A2} , Π_{A3}) при работе на стоянках A (C):

$$\Pi_{A1} = \frac{V_{A1}}{t_{A1}}; \Pi_{A2} = \frac{V_{A2}}{t_{A2}}; \Pi_{A3} = \frac{V_{A3}}{t_{A3}},$$

где $t_{A1} = \sum_{j=1}^3 t_{Aj}$, $t_{A2} = \sum_{j=2}^3 t_{Aj}$, $t_{A3} = \sum_{j=3}^3 t_{Aj}$.

Согласно формуле (2), функциональное время, затраченное для производства 1 м³ древесины (τ_{A1} , τ_{A2} , τ_{A3}):

$$\tau_{A1} = \frac{t_{A1}}{V_{A1}}; \tau_{A2} = \frac{t_{A2}}{V_{A2}}; \tau_{A3} = \frac{t_{A3}}{V_{A3}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_A) на данной стоянке:

$$T_A = \sum_{j=1}^3 \frac{\tau_{Aj}}{3},$$

тогда общая производительность (Π_A) последовательно выполняемых трех операций на стоянке A :

$$\Pi_A = \frac{1}{T_A}.$$

Технологическое функциональное время (T_A^*) выполнения операций на стоянке A определяется как

$$T_A^* = T_A \sum_{j=1}^3 V_{Aj}.$$

В общем случае имеет место неравенство

$$T_A \sum_{j=1}^3 V_{Aj} \neq \frac{\sum_{j=1}^3 V_{Aj}}{\sum_{j=1}^3 t_{Aj}},$$

которое переходит в равенство при следующем условии: объем и время загрузки каждой операции одинаковые.

По аналогии с A (C) рассмотрим производительность на следующих характерных стоянках B (E , G), D (H), F , I .

Определяем производительность КС (Π_{B1} , Π_{B2}) при выполнении им каждой из двух операций на стоянках B (E , G):

$$\Pi_{B1} = \frac{V_{B1}}{t_{B1}}; \Pi_{B2} = \frac{V_{B2}}{t_{B2}},$$

где $t_{B1} = \sum_{j=1}^2 t_{Bj}$, $t_{B2} = \sum_{j=2}^2 t_{Bj}$.

Функциональное время производства 1 м³ операций (τ_{B1} , τ_{B2}):

$$\tau_{B1} = \frac{t_{B1}}{V_{B1}}; \tau_{B2} = \frac{t_{B2}}{V_{B2}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_B) на данной стоянке:

$$T_B = \sum_{j=1}^5 \frac{\tau_{Bj}}{5}.$$

Тогда производительность (Π_B) на стоянке B :

$$\Pi_B = \frac{1}{T_B}.$$

Определяем производительность операции КС (Π_{D1}) при работе на стоянке D (H):

$$\Pi_{D1} = \frac{V_{D1}}{t_{D1}}.$$

Соответственно, функциональное время производства 1 м³ операции (τ_D):

$$\tau_D = \frac{t_{D1}}{V_{D1}}.$$

И функциональное время производства 1 м³ древесины (T_D) на данной стоянке равно τ_D .

Тогда производительность (Π_D) на стоянке D :

$$\Pi_D = \frac{1}{T_D} = \Pi_{D1}.$$

Определяем производительность каждой из восьми операций КС (Π_{F1} , Π_{F2} , Π_{F3} , Π_{F4} , Π_{F5} , Π_{F6} , Π_{F7} , Π_{F8}) при работе на стоянке F :

$$\Pi_{F1} = \frac{V_{F1}}{t_{F1}}; \Pi_{F2} = \frac{V_{F2}}{t_{F2}}; \Pi_{F3} = \frac{V_{F3}}{t_{F3}}; \Pi_{F4} = \frac{V_{F4}}{t_{F4}}; \Pi_{F5} = \frac{V_{F5}}{t_{F5}}; \Pi_{F6} = \frac{V_{F6}}{t_{F6}}; \Pi_{F7} = \frac{V_{F7}}{t_{F7}}; \Pi_{F8} = \frac{V_{F8}}{t_{F8}},$$

$$\text{где } t_{F1} = \sum_{j=1}^8 t_{Fj}; t_{F2} = \sum_{j=2}^8 t_{Fj}; t_{F3} = \sum_{j=3}^8 t_{Fj}; t_{F4} = \sum_{j=4}^8 t_{Fj}, t_{F5} = \sum_{j=5}^8 t_{Fj},$$

$$t_{F6} = \sum_{j=6}^8 t_{Fj}, t_{F7} = \sum_{j=7}^8 t_{Fj}, t_{F8} = \sum_{j=8}^8 t_{Fj}.$$

Функциональное время производства 1 м³ операций (τ_{F1} , τ_{F2} , τ_{F3} , τ_{F4} , τ_{F5} , τ_{F6} , τ_{F7} , τ_{F8}):

$$\tau_{F1} = \frac{t_{F1}}{V_{F1}}; \tau_{F2} = \frac{t_{F2}}{V_{F2}}; \tau_{F3} = \frac{t_{F3}}{V_{F3}}; \tau_{F4} = \frac{t_{F4}}{V_{F4}}; \tau_{F5} = \frac{t_{F5}}{V_{F5}}; \tau_{F6} = \frac{t_{F6}}{V_{F6}}; \tau_{F7} = \frac{t_{F7}}{V_{F7}}; \tau_{F8} = \frac{t_{F8}}{V_{F8}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_F) на данной стоянке:

$$T_F = \sum_{j=1}^8 \frac{\tau_{Fj}}{8}.$$

Тогда производительность (Π_F) на стоянке F :

$$\Pi_F = \frac{1}{T_F}.$$

Определяем производительности каждой из пяти операций КС (Π_{I1} , Π_{I2} , Π_{I3} , Π_{I4} , Π_{I5}) при работе на стоянке I :

$$\Pi_{I1} = \frac{V_{I1}}{t_{I1}}; \Pi_{I2} = \frac{V_{I2}}{t_{I2}}; \Pi_{I3} = \frac{V_{I3}}{t_{I3}}; \Pi_{I4} = \frac{V_{I4}}{t_{I4}}; \Pi_{I5} = \frac{V_{I5}}{t_{I5}}.$$

$$\text{где } t_{I1} = \sum_{j=1}^5 t_{Ij}; t_{I2} = \sum_{j=2}^5 t_{Ij}; t_{I3} = \sum_{j=3}^5 t_{Ij}; t_{I4} = \sum_{j=4}^5 t_{Ij}; t_{I5} = \sum_{j=5}^5 t_{Ij}.$$

Функциональное время производства 1 м³ операций (τ_{I1} , τ_{I2} , τ_{I3} , τ_{I4} , τ_{I5}):

$$\tau_{I1} = \frac{t_{I1}}{V_{I1}}; \tau_{I2} = \frac{t_{I2}}{V_{I2}}; \tau_{I3} = \frac{t_{I3}}{V_{I3}}; \tau_{I4} = \frac{t_{I4}}{V_{I4}}; \tau_{I5} = \frac{t_{I5}}{V_{I5}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_I) на данной стоянке равно:

$$T_l = \sum_{j=1}^5 \frac{\tau_{lj}}{5}.$$

Тогда производительность (Π_l) на стоянке l :

$$\Pi_l = \frac{1}{T_l}.$$

Конечное время на получение единицы продукции для поставки потребителю (для штабеля готовой продукции) представляет производственный интерес, поэтому рассмотрим сопутствующую загрузке операцию складирования древесины в грузовой отсек КС. В этих условиях время первой операции на первой стоянке A (C) переходит в

$$Q_{A1} = T_{A1} + q_{A1} + q,$$

где Q_{A1} – общее время от загрузки до разгрузки; T_{A1} – общее время загрузки; q_{A1} – общее время всех переходов КС между стоянками до разгрузки; q – общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки.

Общее время загрузки:

$$T_{A1} = \sum_{j=1}^3 t_{Aj} + \sum_{j=1}^2 t_{Bj} + \sum_{j=1}^3 t_{Cj} + \sum_{j=1}^1 t_{Dj} + \sum_{j=1}^2 t_{Ej} + \\ + \sum_{j=1}^8 t_{Fj} + \sum_{j=1}^2 t_{Gj} + \sum_{j=1}^1 t_{Hj} + \sum_{j=1}^5 t_{lj}.$$

Общее время всех переходов КС (q_{Ai}) между стоянками до разгрузки:

$$q_{A1} = \sum_{k=1}^8 t_k,$$

где t_k – время одного перехода.

Общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки q :

$$q = \frac{L}{v},$$

где L – расстояние трелевки от A до места разгрузки; v – скорость КС от A до места разгрузки.

Тогда функциональное время производства 1 м³ древесины (T_{A1}^*):

$$T_{A1}^* = \frac{Q_{A1}}{V_{A1}}.$$

В соответствии с построенным алгоритмом время на второй операции на первой стоянке A (C) переходит в

$$Q_{A2} = T_{A2} + q_{A2} + q,$$

где Q_{A2} – общее время от загрузки до разгрузки; T_{A2} – общее время загрузки; q_{A2} – общее время всех переходов КС между стоянками до разгрузки; q – общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки.

Общее время загрузки:

$$T_{A2} = \sum_{j=2}^3 t_{Aj} + \sum_{j=1}^2 t_{Bj} + \sum_{j=1}^3 t_{Cj} + \sum_{j=1}^1 t_{Dj} + \sum_{j=1}^2 t_{Ej} + \\ + \sum_{j=1}^8 t_{Fj} + \sum_{j=1}^2 t_{Gj} + \sum_{j=1}^1 t_{Hj} + \sum_{j=1}^5 t_{lj}.$$

Общее время всех переходов КС (q_{Ai}) между стоянками до разгрузки определяется по формуле

$$q_{A2} = \sum_{k=2}^8 t_k,$$

где t_k – время одного перехода.

Тогда функциональное время производства 1 м³ древесины (T_{A2}^*):

$$T_{A2}^* = \frac{Q_{A2}}{V_{A2}}.$$

В соответствии с построенным алгоритмом время второй операции на первой стоянке A (C) переходит в

$$Q_{A3} = T_{A3} + q_{A3} + q,$$

где Q_{A3} – общее время от загрузки до разгрузки; T_{A3} – общее время загрузки; q_{A3} – общее время всех переходов КС между стоянками до разгрузки; q – общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки.

Общее время загрузки:

$$T_{A3} = \sum_{j=3}^3 t_{Aj} + \sum_{j=1}^2 t_{Bj} + \sum_{j=1}^3 t_{Cj} + \sum_{j=1}^1 t_{Dj} + \sum_{j=1}^2 t_{Ej} + \\ + \sum_{j=1}^8 t_{Fj} + \sum_{j=1}^2 t_{Gj} + \sum_{j=1}^1 t_{Hj} + \sum_{j=1}^5 t_{Ij}.$$

Общее время всех переходов КС (q_{A3}) между стоянками до разгрузки:

$$q_{A3} = \sum_{k=3}^8 t_k,$$

где t_k – время одного перехода.

Тогда функциональное время производства 1 м³ древесины (T_{A3}^*):

$$T_{A3}^* = \frac{Q_{A3}}{V_{A3}}.$$

Предложенная методика определения функционального времени производства 1 м³ древесины для одной операции позволяет вычислить функциональное время производства 1 м³ древесины для множества операций. Суммированием этих функциональных времен определяется функциональное время производства 1 м³ древесины всего множества (T^*):

$$T^* = \frac{\sum_{j=1}^8 \sum_{i=A}^I T_{ij}}{27}.$$

Общую производительность технологического процесса последовательного выполнения всех операций от первой до разгрузки следует определять как

$$\Pi = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Заключение

Системный подход позволил установить единое функциональное время связности всех технологических операций (от начальной операции «загрузка» до конечной операции «начало разгрузки»), выполняемых колесным сортирентоподборщиком. Эффективная производительность определяется на основе расчета функционального времени производства единицы продукции (1 м³ древесины) в едином технологическом процессе, в котором все множество операций образуют взаимосвязанную и глубоко интегрированную пространственно-временную производственную систему. Если для выполняемых технологических операций объем древесины в грейферном захвате гидроманипулятора и время перехода между стоянками принять постоянными, то формула (3) соответствует формуле (1). В общем случае данные параметры являются статистическими переменными, поэтому расчеты существенно усложняются, и

для ускорения процесса обработки входящей информации, по мнению авторов, требуются усовершенствованные специализированные программные решения, например системы контроля и управления колесным сортиментоподборщиком Ponsse Opti 4G™ [23] и Ponsse Opti Control™ (в том числе Ponsse OptiPC™ и ПО Ponsse Forwarder™, функция отслеживания производительности Opti Progress Control™, приложение с системой геопозиционирования Opti Map 2™), применение которых позволяет планировать и использовать оптимальную трассировку волоков и отслеживать параметры лесной машины практически в режиме реального времени. Однако при использовании устройств разных фирм-изготовителей для разработки совместных лесосек (например, валочно-сучкорезной-раскряжевой машины John Deere и колесного сортиментоподборщика Rottne) потребуются разработка межплатформенного унифицированного по стандарту StanForD2010 программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Залесов С.В., Мехренцев А.В. Сортиментная заготовка древесины. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 140 с. [Azarenok V.A., Gerts E.F., Zalesov S.V., Mekhrentsev A.V. *Cut-to-Length Timber Harvesting*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2015. 140 p.]
2. Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений: Теория и применение в лесном комплексе. Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. 200 с. [Andreyev V.N., Gerasimov Yu.Yu. *Optimal Decision Making: Theory and Application in the Forestry Complex*. Joensuu, Joensuu University Press, 1999. 200 p.]
3. Базаров С.М., Бельский Ю.И., Соловьев А.Н. Основы системного анализа производственных процессов. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 60 с. [Bazarov S.M., Belenskij Yu.I., Soloviov A.N. *Fundamentals of System Analysis of Production Processes*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2018. 60 p.]
4. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. Тбилиси: Метсниереба, 1974. 234 с. [Burkov V.N., Gorgidze I.A., Lovetskiy S.E. *Applied Problems of Graph Theory*. Tbilisi, Metsniyereba Publ., 1974. 234 p.]
5. Валяженков В.Д., Григорьев И.В. Современные машины и технологические процессы лесосечных работ. СПб.: СПбГЛТА, 2009. 288 с. [Valyazhenkov V.D., Grigoriev I.V. *Modern Machines and Technological Processes of Logging Operations*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2009. 288 p.]
6. Гладков Е.Г., Фаст В.И. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок. СПб.: ЛТА, 1994. 45 с. [Gladkov E.G., Fast V.I. *Modeling and Optimization of Logging Processes*. Saint Petersburg, LTA Publ., 1994. 45 p.]
7. Дербин В.М., Дербин М.В. Совершенствование сортиментной заготовки древесины // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 1(17). С. 128–135. [Derbin V.M., Derbin M.V. Improving Cut-to-Length Timber. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2015, vol. 5, no. 1(17), pp. 128–135]. DOI: [10.12737/11270](https://doi.org/10.12737/11270)
8. Евдокимов Б.П., Кормищикова З.И. Зарубежные лесные машины. Сыктывкар: СЛИ, 2007. 140 с. [Evdokimov B.P., Kormshchikova Z.I. *Foreign Forest Machines*. Syktyvkar, SLI Publ., 2007. 140 p.]
9. Кочегаров В.Г., Бит Ю.А. Технология и машины лесосечных работ. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 392 с. [Kochegarov V.G., Bit Yu.A. *Technology and Machines of Logging Operations*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1990. 392 p.]
10. Свойкин Ф.В., Григорьев И.В. Прогнозирование продолжительности периода разработки зимних лесосек в условиях Республики Коми // Тр. лесоинж. ф-та ПетрГУ, 2010. № 8. С. 34–37. [Svoikin F.V., Grigoriev I.V. Forecasting the Duration of the

Development Period for Winter Felling Sites in the Komi Republic. *Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2010, no. 8, pp. 34–37].

11. Свойкин В.Ф., Молчанова А.А. Исследование производительности лесных машин // Февральские чтения: сб. материалов науч.-практ. конф. проф.-преподават. состава Сыктывкар. лесн. ин-та по итогам науч.-исслед. работы в 2013 г. Сыктывкар, СЛИ, 2014 г. с. 370–373. [Svoikin V.F., Molchanova A.A. Research of Productivity of Forest Machines. *February Readings. Collection of Materials of the Scientific-Practical Conference of the Teaching Staff of the Syktyvkar Forestry Institute Based on the Results of Research Work in 2013*. Syktyvkar, SLI Publ., 2014, pp. 370–373].

12. Свойкин В.Ф., Молчанова А.А. Исследование производительности трелевочной машины в средней тайге Республики Коми // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-4(10-4). С. 275–279. [Svoikin V.F., Molchanova A.A. Performance Analysis Skidders in the Middle Taiga Komi Republic. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, vol. 2, no. 5-4(10-4), pp. 275–279]. DOI: [10.12737/7115](https://doi.org/10.12737/7115)

13. Brokmeier H., Strunk M. Struktur und Geschäftsfelder niedersächsischer Forstunternehmen. *Forst und Technik*, 2008, pp. 24–27.

14. Drewes D. Bestandesvorbereitung in der hochmechanisierten Holzernte. *Forsttechnik*, 2010. 12 p.

15. Drushka K., Orushka K., Kontinen H. *Tracks in the Forest: The Evolution of Logging Machinery*. Helsinki, Timberjack Group, 1997. 254 p.

16. Fleischer M. *Geschichte der Holzernte in Handarbeit*. Germany, Projekte-Verlag Cornelius, 2009. 212 p.

17. Kokkarinen J. *Koneellinen puunkorjuu – Hallitusti hyvään tulokseen*. Helsinki, Metsäteho Oy, 2013. 91 p.

18. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A New Paradigm in a Changing World and Climate. *Science of the Total Environment Journal*, 2018, vol. 634, pp. 1385–1397. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.04.084](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084)

19. *Spare Parts Catalog Ponsse A090200*. Finland, PonsseOyj, 2016. 431 p.

20. Stampfer K., Strinmuller T. *Harvester und Seilgerät im Steilgelände – Valmet 911.1 X3 M und Synchronfalke*. Wien, Universität für Bodenkultur, 2004. 25 S.

21. Thieme F. Naturgemäße Waldwirtschaft und modern Foresttechnik. *FT*, 1999, S. 12–13.

22. *User Manual. Operator Book Ponsse Buffalo (8WD)*. Finland, Ponsse Oyj, 2012. 181 p.

23. *User Manual. Operator Book Ponsse Opti 4G.4.705*. Finland, Ponsse Oyj, 2009. 382 p.

SYSTEM ANALYSIS OF PROCESS EFFICIENCY OF THE WHEELED FORWARDER

Sergey M. Bazarov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAW-5363-2020](https://orcid.org/0000-0003-1605-5834),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Iurii I. Belenkii¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAX-2680-2020](https://orcid.org/0000-0002-4170-3664),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>

Sergey A. Ugryumov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

*Fedor V. Svoikin*¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

*Vladimir F. Svoikin*², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

¹St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, leter U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: s.bazarow@yandex.ru, 2000zalom@gmail.com, ugr-s@yandex.ru, svoikin_fv@mail.ru

²Syktvykar Forest Institute – Branch of St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, ul. Lenina, 39, Syktvykar, 167982, Russian Federation; e-mail: svoikinvf@mail.ru

Abstract. One of the promising directions of increasing productivity in forestry production is a systematic approach to specifying the process efficiency of the wheeled forwarder based on constructing a single technological connectivity of all performed operations from the initial “loading” to the final “start of unloading”. System analysis allows to form coherent and flexible technological processes as single space-time production structures. The process efficiency of such structures depends on the extent to which the basis of the system analysis is used in assessing the fleet of forestry equipment or its elements. The basis of the unified connectivity of the discrete operations (the movement of the forest machine along the skidding track from pack to pack, setting the crane to the operating position, moving the grip towards the log, grabbing the log on the ground, sorting the log, aligning the pack, moving the pack into the cargo compartment, placing the log into the cargo compartment, installation of the crane into the transport position, and movement along the skidding track) from the position of the system theory is a representation of the functional time of manufacturing a production unit (1 m³ of wood) by operation and its superposition for all production operations. The superposition builds a single functional time for the integrity of the operations performed, in which the target function of the production structure is efficiently implemented. An analytical study of determining the effective performance in the functional time of the production process of the wheeled forwarder is given from the position of the system analysis. The article examines the timing of the work of the Ponsse Buffalo wheeled forwarder in the most typical natural and industrial conditions of the rental base of the Mondi Syktvykar JSC (middle taiga of the Komi Republic). The method of calculating the total capacity of the wheeled forwarder as a result of performance of all operations (loading, storage, and transportation to the place of unloading) is proposed. The possibility of applying the proposed method of assessing the wheeled forwarder efficiency is shown in terms of implementation of forecasting the total productivity of the forest machine in the functional time of manufacturing a production unit. The method allows you to choose the directions of increasing the labor productivity by synchronizing the functional time of all production operations.

For citation: Bazarov S.M., Belenkii Iu.I., Ugryumov S.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F. System Analysis of Process Efficiency of the Wheeled Forwarder. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 116–129. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-116-129

Keywords: wheeled forwarder, system analysis, process efficiency, technological operations, functional time, productivity.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила 26.02.20 / Received on February 26, 2020

УДК 630*36/.37:630.383(047.31)

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-130-142

МОЩНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛОВ МУЛЬЧЕРА ПРИ УДАЛЕНИИ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

*С.Е. Арико*¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAK-2167-2020](https://orcid.org/0000-0001-6812-8842).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6812-8842>

*С.А. Войнаш*², инж.; *ResearcherID*: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

*Д.А. Кононович*¹, аспирант; *ResearcherID*: [AAK-2583-2020](https://orcid.org/0000-0001-6947-0674).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6947-0674>

*В.А. Соколова*³, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

¹Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13а, Минск, Республика Беларусь, 220006; e-mail: sergeyariko@mail.ru, denkon_92@mail.ru

²Новосибирский государственный аграрный университет, ул. Добролюбова, д. 160, г. Новосибирск, Россия, 630039; e-mail: sergey_voi@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: sokolova_vika@inbox.ru

Аннотация. В последние годы на предприятиях лесного хозяйства и энергетики Республики Беларусь и других стран широко внедряются перспективные фрезерные орудия, предназначенные для измельчения древесины, пней и корней без погружения фрезы в почву (мульчеры) и с погружением (ротоваторы), что позволяет подготовить землю под посадку лесных культур. Они могут агрегатироваться на универсально-пропашных тракторах, погрузчиках, экскаваторах. При этом отсутствуют методики, позволяющие осуществлять обоснованный выбор технологического оборудования под конкретную базовую машину, так как на возникающие силовые и мощностные параметры оказывает влияние значительное количество производственно-технологических и технических факторов. Предложенная методика дает возможность учитывать значительное количество изменяемых величин (приемы работы, скорости выполнения различных операций, параметры рабочего органа, его привода и базового шасси, почвогрунтовые условия и др.) и моделировать процесс взаимодействия фрезерных орудий при различных условиях эксплуатации. Установлено, что наибольшие нагрузки на ротор мульчера приходятся в процессе валки древесно-кустарниковой растительности, что связано с увеличением площади взаимодействия резцов с древесиной до 2 раз в сравнении с измельчением аналогичного лежащего древостоя. Данное значение, в зависимости от диаметра обрабатываемых стволов, может быть снижено на 15–30 %. При этом в случае значительного количества (скопления) древостоя диаметром более 10 см предпочтительны осуществление работ на скорости около 0,2 м/с или предварительная валка данных деревьев. Для снижения динамических нагрузок и лучшей приспособляемости рабочего оборудования к природно-производственным условиям (возможность осуществления работ на скорости от 0 до 5 км/ч) перспективным является применение гидроуменьшителей хода или гидрообъемной трансмиссии. Необходимо учитывать, что установленную для привода фрезерного оборудования мощность двигателя следует увеличить на 10–15 % в связи с потребностями привода различного оборудования, расположенного на базовом шасси. Также в случае комплексного использования древесно-кустарниковой растительности возможно применение мульчеров, осуществляющих сбор биомассы, однако это потребует дополнительных затрат энергии. В связи с этим методика может быть

применена при выборе параметров технологического оборудования под имеющееся базовое шасси, решении обратной задачи, а также осуществлении выбора режима эксплуатации фрезерного оборудования в зависимости от природно-производственных условий с возможностью последующего прогнозирования эффективности выполняемых работ.

Для цитирования: Арико С.Е., Войнаш С.А., Кононович Д.А., Соколова В.А. Мощностные характеристики узлов мульчера при удалении древесно-кустарниковой растительности // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 130–142. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-130-142

Ключевые слова: лесовосстановление, измельчение древесно-кустарниковой растительности, фрезерное орудие, мульчер, базовое шасси, условия эксплуатации.

Введение

В настоящее время в лесной отрасли широко внедряются различные фрезерные орудия. Они осуществляют как измельчение древесно-кустарниковой растительности, так и фрезерование почвы с одновременным измельчением пней и корней [2, 4], а также позволяют создавать противопожарные полосы, в том числе в ночное время суток [19]. При проведении лесовосстановления и реконструкции лесонасаждений, кроме применения традиционных лесных машин (харвестеров и форвардеров, машин для транспортировки лесосечных отходов) [4, 6, 22] с последующим удалением пней и корней корчевателями различной конструкции [3, 5, 10], перспективным является применение мульчеров и ротаторов [1, 8, 12], которые требуют значительных затрат мощности на их привод. В связи с этим целью исследований является изучение влияния различных природно-производственных факторов на выбор параметров технологического оборудования [15, 21], базового шасси [11] и их надежность [18, 20]. В настоящий момент отсутствуют методики и рекомендации, позволяющие производить расчет фрезерного оборудования для имеющегося базового шасси или решать обратную задачу, в том числе на основе математического моделирования [11, 13].

Учитывая преимущественное распространение фрезерных орудий при измельчении древесно-кустарниковой растительности необходимым является рассмотрение двух наиболее характерных расчетных случаев работы мульчера: в режиме валки древесно-кустарниковой растительности и ее измельчения без погружения в землю [2]. При этом разработанная методика исследования позволяет учитывать не только заявленные технические характеристики производителей данного технологического оборудования и базовых шасси, но и условия эксплуатации (почвогрунтовые условия, параметры древесно-кустарниковой растительности, технологию проведения работ и др.).

Объекты и методы исследования

Анализ технологий и конструкций техники для расчистки лесных площадей от древесно-кустарниковой растительности [3, 5, 9] показал перспективность использования для этих целей кусторезных машин с активными рабочими органами. Среди них следует выделить кусторезные машины роторного типа с неподвижными и шарнирно закрепленными ножами, которые осуществляют срезание по принципу ударно-силового резания за счет энергии вращающегося

ротора [18]. Существенное преимущество данных машин, в сравнении с другими – это способность одним рабочим органом не только срезать, но и частично измельчать древесно-кустарниковую растительность. Принципы процесса ее срезания и измельчения мульчером являются аналогичными. В ходе изучения процессов валки и измельчения кустарника необходимым условием является определение силовых параметров, требуемых для реализации запланированного объема работ. Расчетная схема представлена на рис. 1.

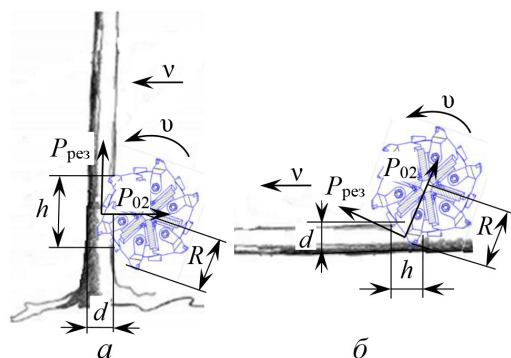


Рис. 1. Расчетные схемы работы фрезерного орудия при валке вертикально стоящего (а) и измельчении лежащего (б) деревьев

Fig. 1. Design schemes for operation of a milling tool when felling a vertically standing tree (a) and chopping a lying tree (б)

Следует отметить, что сопротивление резанию древесины (рис. 1) $P_{рез}$, Н, в общем случае зависит от удельной работы резания K , Дж/м³, высоты среза, или проекции длины резания на ось, нормальную к направлению резания, h , м, максимального диаметра обрабатываемого дерева d , м, скорости движения базового шасси (скорость подачи) v , м/с, и скорости резания $υ$, м/с. При проведении расчетных исследований данную величину можно найти по зависимости

$$P_{рез} = Khd \frac{v}{υ}$$

При этом удельная работа резания определяется по формуле [7]:

$$K = K_0 \alpha_p \alpha_w \alpha_t \alpha_n$$

где K_0 – основное значение удельной работы резания, Дж/м³; α_p , α_w , α_t , α_n – поправочные коэффициенты, учитывающие затупление режущих ножей, влажность и породу обрабатываемого лесоматериала, температуру окружающей среды.

Основное значение удельной работы резания рассчитывается по эмпирической формуле, действительной для подачи c , м, на один зуб 0,05–0,70 мм:

$$K_0 = \frac{36,5 \cdot 10^5}{c^{0,33}}$$

Величина подачи на один зуб c , м, учитывает конструктивное исполнение рабочего органа (количество зубьев в одной плоскости z , шт.), а также ряд технических характеристик базового шасси: скорость движения шасси (подачи) и частоту вращения ротора n , об/мин:

$$c = \frac{60v}{zn}$$

Кроме рассмотренных параметров на процесс взаимодействия технологического оборудования с древесно-кустарниковой растительностью оказывают влияние радиус ротора R , м, который является одной из составляющих при

определении скорости резания, и высота среза, или проекция длины резания на ось, нормальную к направлению резания:

$$v = \frac{\pi n R}{30};$$

$$h = 2\sqrt{2Rd - d^2}.$$

Однако данные зависимости справедливы при рассмотрении процесса резания (валки) вертикально стоящего кустарника, в случае измельчения горизонтально расположенного (лежащего) кустарника значение высоты среза h , м, будет соответствовать диаметру обрабатываемого лесоматериала d , м ($h = d$).

При расчетах следует также учитывать, что при работе технологического оборудования существует необходимость измельчения скоплений мелких деревьев или кустарника, состоящих из 2–5 стволов $n_{\text{ств}}$, шт. Кроме того, большинство современных мульчеров имеют от 42 до 56 подвижных или неподвижных резцов (зубьев), из которых с измельчаемой древесиной одновременно взаимодействует $z_{\text{рез}}$, шт.:

$$z_{\text{рез}} = \frac{z_{\text{общ}} dn_{\text{ств}} \varphi}{2\pi B},$$

где $z_{\text{общ}}$ – общее количество резцов, шт.; φ – угол контакта (взаимодействия) рабочего органа с лесоматериалом, рад; B – рабочая ширина ротора, м.

Тогда выражение для определения усилия резания $P_{\text{рез}}$, Н, примет вид

$$P_{\text{рез}} = K h b_{\text{рез}} z_{\text{рез}} \frac{v}{v},$$

где ширина резца b , м, может задаваться исходя из имеющейся номенклатуры резцов или теоретически по выражению

$$b_{\text{рез}} = \frac{Bz}{z_{\text{общ}}}.$$

На количество одновременно взаимодействующих с древесиной резцов оказывают влияние вид и технология проведения работ. При этом угол контакта (взаимодействия) рабочего органа с лесоматериалом φ , рад, определяется:

при валке вертикально стоящих деревьев

$$\varphi = 2 \arccos\left(\frac{R-d}{R}\right);$$

при измельчении лежащего древостоя и кустарника

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R-d}{R}\right).$$

Так, валка вертикально стоящих деревьев и кустарника приводит к двукратному росту числа резцов в резе, а также увеличивает высоту среза, что значительно повышает требуемое усилие резания и мощность, необходимую для привода технологического оборудования.

Для снижения данного негативного эффекта мульчеры оснащаются толкателем (рис. 2). Это обеспечивает создание предварительного натяжения волокон обрабатываемого древостоя и уменьшает удельные сопротивления резанию на 20–30 %, а также позволяет рассматривать процесс валки древесно-кустарниковой растительности, ввиду наклона стволовой части, подверженной воздействию резцов, как процесс измельчения лежащей древесины.



Рис. 2. Мульчер с толкателем

Fig. 2. Mulcher with a pusher

Кроме усилия резания в процессе взаимодействия режущего органа с обрабатываемым материалом возникает сила отжима P_{02} , определяемая как

$$P_{02} = \alpha_o P_{рез},$$

где α_o – коэффициент, зависящий от формы и степени затупления зубьев.

Данная величина оказывает существенное влияние на сопротивление перемещению шасси. При этом в случае рассмотрения процесса валки горизонтальная составляющая сопротивления движению шасси от процесса резания P_x соответствует значению P_{02} ($P_x = P_{02}$). При измельчении горизонтально расположенной (лежащей) древесно-кустарниковой растительности:

$$P_x = P_{02} \sin(\varphi / 2) - P_{рез} \cos(\varphi / 2).$$

Рассматривая процесс работы фрезерного орудия, общее сопротивление перемещению базового шасси $P_{ш}$, Н, можно найти по выражению

$$P_{ш} = P_x + G_p(\mu_{ст} + i) + G_{ш}(f + i),$$

где G_p – вес рабочего (технологического) оборудования, Н; $\mu_{ст}$ – коэффициент скольжения технологического оборудования по грунту; i – уклон местности; $G_{ш}$ – вес базового шасси, Н; f – коэффициент сопротивления качению.

При этом мощность двигателя, требуемая для реализации технологического процесса:

$$N_{дв} = N_{рез} + N_{отб} + N_{пр} + N_{пер} + N_{тр},$$

где $N_{рез}$, $N_{отб}$, $N_{пр}$, $N_{пер}$, $N_{тр}$ – мощности, затрачиваемые на резание (при валке или измельчении древесно-кустарниковой растительности), отбрасывание мульчи (стружки), преодоление горизонтальной составляющей силы прижатия фрезы, перемещение базового шасси, преодоление сил трения в приводе рабочего органа, Вт, соответственно.

Значительное влияние на затраты мощности оказывает скорость резания v , прямо пропорционально которой изменяются мощности, затрачиваемые на резание $N_{рез}$ и отбрасывание мульчи $N_{отб}$, и косвенно – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в приводе рабочего органа $N_{тр}$, определяющиеся по выражениям:

$$N_{рез} = P_{рез} v;$$

$$N_{отб} = P_{отб} v;$$

$$N_{тр} = (1 - \eta)(N_{рез} + N_{отб} + N_{пр}),$$

где $P_{отб}$ – сопротивление отбрасыванию стружки, Н; η – КПД привода орудия.

Возникает сопротивление отбрасыванию стружки $P_{отб}$, Н:

$$P_{отб} = 0,5K_{отб}^2 chd\rho v,$$

где $K_{отб}$ – коэффициент отбрасывания; ρ – плотность древесины, кг/м³.

От скорости движения базового шасси зависят мощности, затрачиваемые на преодоление горизонтальной составляющей силы прижатия фрезы $N_{пр}$, Вт, а также на перемещение шасси $N_{пер}$, Вт, определяемые по выражениям:

$$N_{пр} = P_x v;$$

$$N_{пер} = P_{ш} v.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Первоочередное внимание следует уделить сравнению возникающих силовых и мощностных параметров [17] при различных способах осуществления измельчения древесно-кустарниковой растительности (рис. 3). Для этого рассмотрим процессы валки и измельчения отдельно стоящих деревьев и их скоплений из 3–5 шт. диаметром 3...20 см, что позволит смоделировать различные лесорастительные условия. При этом процесс выполнения технологических операций рассматривался при скорости движения базового шасси до 5 км/ч (при рекомендуемой многими производителями 0,2–2 км/ч), частоте вращения ротора 1000 об/мин, имеющего рабочую ширину 2,0 м, диаметр – 55 см и оснащенного 48 неподвижными резцами. Вес технологического оборудования составлял 16 кН. В качестве базового шасси рассмотрим широко применяемый в лесном хозяйстве трактор «Беларус Л1221-03», оснащенный реверсивным постом управления и имеющий вес 56 кН.

В соответствии с проведенными исследованиями (рис. 3) установлено, что на затраты мощности при осуществлении валки и измельчения древесно-кустарниковой растительности существенное влияние оказывают как диаметр обрабатываемого дерева, так и скорость движения базового шасси.

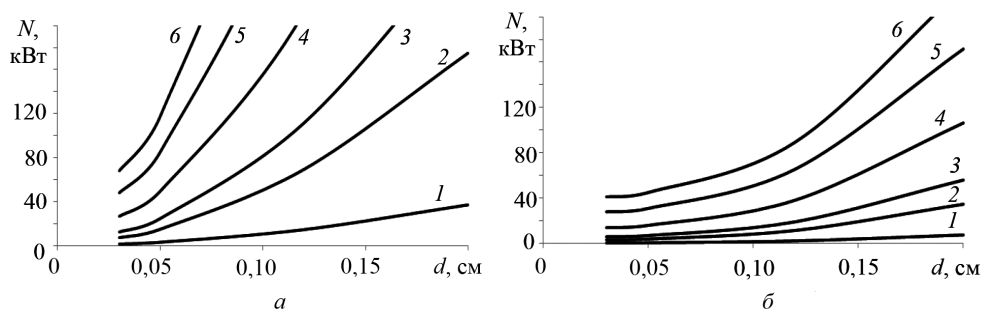


Рис. 3. Исследование влияния диаметра древостоя и скорости движения базового шасси (1 – 0,01, 2 – 0,1, 3 – 0,2, 4 – 0,5, 5 – 1,0, 6 – 1,5 м/с) на потребляемую мощность двигателя при валке (а) и измельчении (б) древесно-кустарниковой растительности

Fig. 3. Study of the influence of the stand diameter and the movement speed of the chassis (1 – 0.01, 2 – 0.1, 3 – 0.2, 4 – 0.5, 5 – 1.0, 6 – 1.5 m/s) on the engine power consumption during felling (a) and chopping (b) of tree and shrub vegetation

При этом следует отметить, что применение в качестве базового шасси трактора «Беларус Л1221-03», имеющего мощность двигателя 95,6 кВт, обеспечивает валку отдельностоящих деревьев диаметром до 15 см при скорости движе-

ния около 0,4 км/ч, а диаметром 10 см – 0,7 км/ч. Обработка древостоя большего диаметра может осуществляться на заданных скоростях при использовании толкающей рамы или за счет понижения скорости движения трактора. Данная машина выполняет достаточно эффективное измельчение древесно-кустарниковой растительности. Так, измельчение отдельно уложенных деревьев диаметром до 12 см может производиться на скорости около 5 км/ч, что позволяет применять на данных работах трактор без ходуменьшителя.

При осуществлении мульчирования лесных площадей зачастую встречаются скопления из нескольких деревьев (рис. 4). При этом фрезерным оборудованием с трактором Л1221-03 можно эффективно выполнять измельчение кустарника диаметром до 7 см при скоплениях стволов вдоль рабочего органа не более 10 шт. на скорости до 2 км/ч. Однако при аналогичных скорости и параметрах кустарника фрезерное орудие в режиме валки с использованием толкателя может эффективно обрабатывать лишь один ствол.

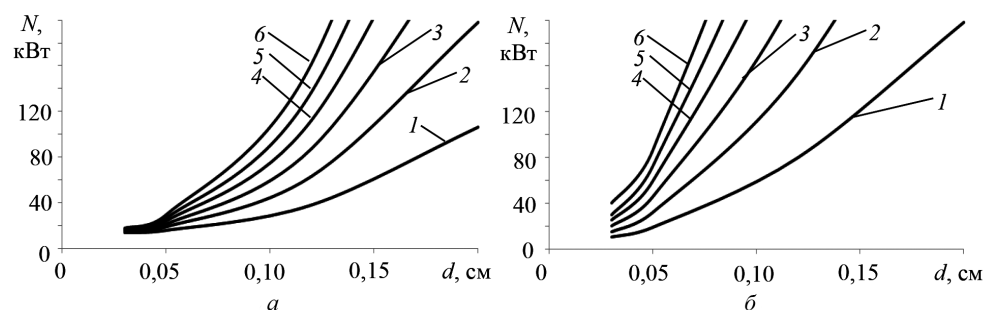


Рис. 4. Исследование влияния диаметра и количества стволов древостоя (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4, 5 – 5, 6 – 6 стволов) на потребляемую мощность двигателя при измельчении (а) и валке (б) древесно-кустарниковой растительности

Fig. 4. Study of the influence of the diameter and number of stand trunks (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4, 5 – 5, 6 – 6 trunks) on the engine power consumption during chopping (а) and felling (б) tree and shrub vegetation

При снижении скорости движения до 0,72 км/ч (0,2 м/с) оборудование сможет осуществлять валку 2 деревьев диаметром около 10 см или скопления из 7 деревьев диаметром 5 см. При этом в случае наклона дерева в сторону движения базового шасси за счет изменения пространственного положения древесно-кустарниковой растительности и создания предварительного натяга волокон древесины в зоне работы фрезерного оборудования затраты мощности в процессе валки данной растительности будут отличаться от затрат на ее измельчение не более чем на 30 %, а при диаметре до 10 см – не более чем на 15 %. Учитывая, что преобладающий объем удаляемого кустарника имеет диаметр до 10 см, использование в качестве базового шасси трактора «Беларус Л1221-03» позволяет эффективно осуществлять расчистку площадей от древесно-кустарниковой растительности на скорости до 1 км/ч (до 0,3 м/с).

Однако при этом следует учесть тот факт, что с увеличением скорости выполняемых операций изменяется соотношение затрат мощности на привод технологического оборудования и на осуществление перемещения базового шасси, что необходимо учитывать при выборе как параметров технологическо-

го оборудования, так и базового шасси. Это связано с тем, что ряд производителей не допускает использования более 70 % заявленной мощности устанавливаемого двигателя на привод вала отбора мощности. Специализированное шасси позволяет реализовывать около 90 % мощности двигателя. При этом использование вместо механического привода технологического гидравлического оборудования также требует повышения потребляемой мощности на 14–21 %, что связано с понижением коэффициента полезного действия. Однако данный недостаток может быть частично компенсирован за счет повышения коэффициента использования двигателя по мощности, а также обеспечения реверсивности движения ротора, что позволяет сократить затраты времени на его расклинивание при попадании значительного объема измельчаемого материала между ротором и корпусом или капотом фрезерного орудия. Применение данного типа привода облегчает процесс агрегатирования технологического оборудования на погрузчиках, экскаваторах и другой технике, обеспечивает снижение динамических нагрузок на двигатель. При этом предъявляются меньшие требования к навесной системе ввиду отсутствия карданной передачи, применение которой ограничивает высоту подъема технологического оборудования при его работе [14, 16].

Чтобы оценить влияние других факторов на требуемую мощность базового шасси, рассмотрим процесс измельчения древесно-кустарниковой растительности диаметром 10 см при скорости движения шасси 0,2 м/с. Учитывая, что рабочая ширина ротора косвенно влияет на возникающее сопротивление, для адекватной оценки влияния данного фактора вместо количества одновременно обрабатываемых стволов будем брать в расчет количество стволов, попадающих на 1 м рабочей длины. Примем 4 ствола на 1 м рабочей длины. Пропорционально увеличению ширины рабочего органа необходимо повышать общее число резцов, так как у образцов большинства производителей количество рядов резцов влияет на ширину.

Результаты исследований (см. таблицу) показывают, что увеличение ширины на 50 см требует повышения мощности двигателя на 9,8 кВт для заданных параметров древостоя (при среднем диаметре обрабатываемого кустарника 12 см прирост мощности должен составлять порядка 15,5 кВт).

Влияние ширины рабочего органа и числа резцов на требуемую мощность

B , мм	z , шт	$n_{\text{ств}}$, шт	N , кВт	Δ , %
2000	48	8	83,8	100
2250	52	9	93,6	112
2500	56	10	103,4	123

Также было установлено, что на затраты мощности существенное влияние оказывает не количество резцов, а ширина резания (взаимодействия), которая зависит от ширины непосредственно используемой поверхности рабочего органа, количества и диаметра обрабатываемых стволов. Опыт эксплуатации данного оборудования показывает, что увеличение количества резцов способствует снижению динамики процесса резания за счет смещения плоскостей, участвующих в работе, при этом сокращается нагрузка на отдельные резцы, повышая надежность орудия.

Следует также отметить, что при расчетах не учитывали изменение массы базового шасси, однако часто увеличение мощности на привод технологического оборудования требует использования базового шасси, имеющего больший вес, что потребует и больших затрат мощности на перемещение, которая также будет зависеть и от скорости перемещения машины. При работе на грунтах с хорошей несущей способностью увеличение массы, по сравнению с массой базового шасси «Беларус Л1221-03», на 1 т потребует повышения мощности на 1,5 кВт при рабочей скорости 0,5 м/с и на 4,8 кВт при скорости 1,5 м/с.

Заключение

При выборе оборудования и базового шасси первоочередное внимание следует уделить предполагаемому объему работ (площадь, параметры древостоя и др.), имеющемуся или планируемому парку машин, которые могут являться энергоносителем для фрезерных органов. При этом не следует стремиться устанавливать механизмы на базовое шасси с мощностью двигателя равной минимальному значению из диапазона, заявленного производителем технологического оборудования. Это приведет как к снижению производительности выполняемых работ, так и к увеличению затрат на ремонт, ввиду выхода из строя постоянно высоконагруженных элементов шасси.

Производители одни и те же устройства рекомендуют для установки на шасси, имеющие существенную разницу в своих характеристиках, в то время как требуемая мощность на привод фрезерных рабочих органов может отличаться в 2 раза. Это связано с тем, что рабочий процесс взаимодействия фрезерных орудий с древесно-кустарниковой растительностью является достаточно многофакторным. Проведенные исследования позволили установить, что на процесс удаления древесно-кустарниковой растительности и выбор параметров базового шасси наибольшее влияние оказывают: диаметр стволов, их количество, приходящееся на 1 м рабочей длины ротора, густота растительности, скорость движения базового шасси. В случае использования в качестве энергоносителя универсально-пропашных тракторов предпочтительным является наличие реверсивного поста управления и гидроуменьшителя хода. Это позволяет улучшить работу оператора, а также выбрать оптимальную скорость движения в заданных условиях эксплуатации, обеспечивая ее плавное изменение. При работе с кустарником, имеющим преобладающий диаметр около 7 см, эффективная скорость движения для трактора «Беларус Л1221-03» будет составлять 0,4–0,5 м/с, а единовременные незначительные перегрузки могут быть сглажены за счет инерционной массы ротора, а также за счет снижения скорости движения.

В соответствии с результатами расчетов установлено, что на мульчирование деревьев требуется в 1,7–2,1 раза меньше мощности, чем на их валку. Более равномерного распределения затрат мощности на валку и измельчение древесно-кустарниковой растительности можно достичь за счет оснащения мульчера толкателем. Это обеспечит предварительное натяжение волокон обрабатываемого древостоя и снизит удельные сопротивления резанию на 20–30 %, в том числе и за счет изменения пространственного положения ствола в процессе валки. В связи с этим при осуществлении уборки древесно-кустарниковой

растительности предпочтительна предварительная валка крупных деревьев, которые могут быть использованы для получения лесоматериала или в энергетических целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абдразаков Ф.К., Потанов И.Н., Мараев В.Н. Перспективные технологии и средства удаления древесно-кустарниковой растительности // Механизация строительства. 2007. № 4. С. 13–17. [Abdrakov F.K., Potanov I.N., Marayev V.N. Promising Technologies and Means for Removing Tree and Shrub vegetation. *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Construction mechanization], 2007, no. 4, pp. 13–17].

2. Арико С.Е., Мохов С.П., Симанович В.А., Дудко Е.М. Применение фрезерного оборудования в лесном комплексе Республики Беларусь // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». Могилев: БРУ, 2017. С. 197–198. Режим доступа: <http://e.biblio.bru.by/handle/12121212/4759> (дата обращения: 30.03.20). [Ariko S.Ye., Mokhov S.P., Simanovich V.A., Dudko Ye.M. The Use of Milling Equipment in the Forest Complex of the Republic of Belarus. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies"*. Mogilev, BRU Publ., 2017, pp. 197–198].

3. Арико С.Е., Симанович В.А., Мохов С.П., Голякевич С.А., Кононович Д.А., Дудко Е.М., Путрич А.Ю. Лесохозяйственная машина. Патент Республики Беларусь № 11798, 2018. [Ariko S.Ye., Simanovich V.A., Mokhov S.P., Golyakevich S.A., Kononovich D.A., Dudko Ye.M., Putrich A.Yu. *Forestry Machine*. Patent BY, no. 11798, 2018].

4. Асмоловский М.К., Жуков А.В., Лой В.Н. Механизация лесного и садово-паркового хозяйства. Минск: БГТУ, 2004, 506 с. [Asmolovskiy M.K., Zhukov A.V., Loy V.N. *Mechanization of Forestry and Landscape Gardening*. Minsk, BG TU P, 2004. 506 p.].

5. Войнаш С.А., Войнаш А.С. Система унифицированных машин на базе гусеничного форвардера ЛЗ-5 // Строительные и дорожные машины. 2013. № 12. С. 6–9. [Voinash S.A., Voinash A.S. The System of Unified Vehicles Based on the Crawler Forwarder LZ-5. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and Road Building Machinery], 2013, no. 12, pp. 6–9].

6. Войнаш С.А., Кононович Д.А., Арико С.Е., Соколова В.А. Теоретические основы оценки эффективности применения машин для транспортировки лесосечных отходов // Сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. «Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины». Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020. С. 48–55. [Voinash S.A., Kononovich D.A., Ariko S.E., Sokolova V.A. Theoretical Bases of Evaluating the Efficiency of Using Machines for the Transportation of Logging Wastes. *Collection of Academic Papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Forest Exploitation and Integrated Use of Wood"*. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2020, pp. 48–55].

7. Глебов И.Т. Обработка древесины методом фрезерования. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007, 192 с. Режим доступа: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3154/1/Glebov_Odrabotka_drevesiny_2007.pdf (дата обращения: 30.03.20). [Glebov I.T. *Wood Processing by Milling Method*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2007. 192 p.].

8. Ивашнев М.В., Шегельман И.Р. Технология защиты линий электропередачи от деревьев и кустарников с использованием кустореза с активным рабочим органом // Глобальный научный потенциал. 2012. № 4(13). С. 105–107. [Ivashnev M.V., Shegelman I.R. Technology for Protection of Power Transmissions from Trees and Bushes Using Brush Cutter with Active Working Body. *Global'nyy nauchnyy potentsial* [Global Scientific Potential], 2012, no. 4(13), pp. 105–107].

9. Наумов Е.С., Парфенов А.П., Шарипов В.М., Эглит И.М. Рабочее оборудование тракторов. М.: МАМИ, 1999, 89 с. [Naumov E.S., Parfenov A.P., Sharipov V.M., Eglit I.M. *Working Equipment of Tractors*. Moscow, MAMI Publ., 1999. 89 p.]

10. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Обоснование технологии применения и компоновки агрегата для понижения пней // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 123–131. [Orlovskiy S.N., Karnaukhov A.I. Application and Configuration Technology of the Stump Lowering Device. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 3, pp. 123–131]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.3.123](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.123), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/111/2_orlovskiy.pdf

11. Пешков А.А., Гордеев М.П., Сыроватский С.О. Проектирование 3D модели мульчера в системе CAD // Сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки». Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева. 2017. С. 496–498. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36581367_12326028.pdf (дата обращения: 30.03.20). [Peshkov A.A., Gordeev M.P., Syrovatski S.O. The Construction of 3D Models Mulcher in the CAD System. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists "Young Scientists in Solving Urgent Problems of Science"*. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2017, pp. 496–498].

12. Тикачев В. Мульчеры и измельчители пней // ЛесПромИнформ. 2010. № 4(70) С. 76–81. Режим доступа: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=1329> (дата обращения: 30.03.20). [Tikachev V. Mulchers and Stump Grinders. *LesPromInform*, 2010, no. 4(70), pp. 76–81].

13. Alekseeva S.V., Sokolova V.A., Markov V.A. Mathematical Modeling of One Type of Three-Link Robot Manipulator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 421, iss. 4, art. 042005. DOI: [10.1088/1755-1315/421/4/042005](https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/4/042005)

14. Arpit K., Satish M., Mukesh J. Performance Evaluation of Tractor PTO Operated Rotary Mulcher. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2018, vol. 7, iss. 6, pp. 1113–1115. DOI: [10.22271/phyto](https://doi.org/10.22271/phyto)

15. Čedík J., Pexa M., Pražan R., Kubín K., Vondříčka J. Mulcher Energy Intensity Measurement in Dependence on Performance. *Agronomy Research*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 46–52.

16. Khafizov C.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A., Galiev I.G. Justification of the Optimal Annual Load on the Tractor Providing for Its Parameters Stress on the Formed Crop. *BIO Web of Conferences*, 2020, vol. 17, art. 00022. DOI: [10.1051/bioconf/20201700022](https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700022)

17. Kumhála F., Chyba J., Pexa M., Čedík J. Measurement of Mulcher Power Input in Relation to Yield. *Agronomy Research*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 1380–1385.

18. Luptáčíková V., Ťavodová M. Methods for Increasing the Material Resistance of the Mulching Tool Body Against Its Deformation in Operation. *Technological Engineering*, 2017, vol. XIV, no. 2/2017, pp. 17–20. DOI: [10.1515/teen-2017-0015](https://doi.org/10.1515/teen-2017-0015)

19. Savchenkova V.A., Korshunov N.A., Perminov A.V., Voinash S.A. The Problem of Fire Fighting during the Hours of Darkness. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 421, art. 062002. DOI: [10.1088/1755-1315/421/6/062002](https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/6/062002)

20. Ťavodová M., Kalincová D., Kotus M., Pavlík L. The Possibility of Increasing the Wearing Resistance of Mulcher Tools. *Acta Technologica Agriculturae*, 2018, vol. 21, iss. 2, pp. 87–93. DOI: [10.2478/ata-2018-0016](https://doi.org/10.2478/ata-2018-0016)

21. Verma A., Singh Ar., Singh Am., Sidhu S.G., Dixit An. Performance Evaluation of Tractor Operated Paddy Straw Mulcher. *Journal of Krishi Vigyan*, 2016, vol. 4, iss. 2, pp. 70–75. DOI: [10.5958/2349-4433.2016.00016.7](https://doi.org/10.5958/2349-4433.2016.00016.7)

22. Zimelis A., Sisenis L., Sarmulis Z., Ariko S. Technology and Energy Balance in Stump Harvesting with MCR500. *Engineering for Rural Development*, 2018, pp. 1395–1400. DOI: [10.22616/ERDEV2018.17.N162](https://doi.org/10.22616/ERDEV2018.17.N162)

POWER CHARACTERISTICS OF MULCHER JOINTS WHEN REMOVING TREE AND SHRUB VEGETATION

Sergey Ye. Ariko¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAK-2167-2020](https://orcid.org/0000-0001-6812-8842),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6812-8842>

Sergey A. Voinash², Engineer; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

Denis A. Kononovich¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAK-2583-2020](https://orcid.org/0000-0001-6947-0674),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6947-0674>

Viktoriya A. Sokolova³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

¹Belarusian State Technological University, ul. Sverdlova, 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; e-mail: sergeyariko@mail.ru, denkon_92@mail.ru

²Novosibirsk State Agrarian University, ul. Dobrolyubova, 160, Novosibirsk, 630039, Russian Federation; e-mail: sergey_voi@mail.ru

³St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: sokolova_vika@inbox.ru

Abstract. In recent years, the enterprises of forestry and the Ministry of Energy of the Republic of Belarus and other countries widely implemented advanced milling tools designed to chop wood, stumps and roots without immersing the cutter in the soil (mulchers) and with immersion (rotovators), which allows you to prepare the ground for planting forest crops. They can be mounted on multi-purpose tractors, loaders and excavators. At the same time, there are no methods that allow carrying out a reasonable choice of technological equipment for a particular basic machine, since a significant number of production, technological and technical factors have an impact on the emerging power and capacity parameters. The proposed method allows taking into account a significant number of variable values (working methods, speeds of various operations, parameters of the working body, its drive and base chassis, soil conditions, etc.) and simulate the interaction of milling tools under various operating conditions. It was found that the greatest loads on the mulcher rotor occur during the felling of tree and shrub vegetation, which is associated with an increase in the area of interaction between the cutters and the wood up to 2 times compared with the chopping of similar lying stands. This value can be reduced by 15–30 % depending on the diameter of the trunks being processed. In the case of a significant amount (cluster) of forest stands with a diameter of more than 10 cm, it is preferable to carry out work at a speed of about 0.2 m/s or advanced felling of these trees. The use of hydraulic travel (speed) reducers or hydrostatic transmission is promising in order to reduce dynamic loads and get better adaptability of the working equipment to natural-production conditions (the ability to work at a speed from 0 to 5 km/h). It should be noted that the installed required engine power for the milling equipment drive should be increased by 10–15 % due to the needs of the drive of various equipment located on the base chassis. Also, in the case of the integrated use of tree and shrub vegetation, it is possible to use mulchers that collect biomass; however, this will require additional energy costs. In this regard, the method can be applied when choosing the parameters of technological

equipment for the existing base chassis, to solve the inverse problem, and also to select the operating mode of the milling equipment depending on the natural and production conditions with the possibility of subsequent prediction of the effectiveness of the work performed.

For citation: Ariko S.Ye., Voinash S.A., Kononovich D.A., Sokolova V.A. Power Characteristics of Mulcher Joints When Removing Tree and Shrub Vegetation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 130–142. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-130-142

Keywords: reforestation, chopping of tree and shrub vegetation, milling tool, mulcher, base chassis, exploitation conditions.

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

Поступила 30.03.20 / Received on March 30, 2020



УДК 674.8:674.049.2

DOI: 10.17238/0536-1036-2021-2-143-155

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТЕРМОДРЕВЕСНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ
ПРИ БАРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ***Ю.Г. Скурыдин¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>**Е.М. Скурыдина², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>**Р.Г. Сафин³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>**А.Р. Хабибуллина³, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-5176-2021](https://orcid.org/0000-0002-0762-8816),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0762-8816>*

¹Алтайский государственный университет, просп. Ленина, д. 61, г. Барнаул, Россия, 656049; e-mail: skur@rambler.ru

²Алтайский государственный педагогический университет, ул. Молодежная, д. 55, г. Барнаул, Россия, 656031; e-mail: skudem@rambler.ru

³Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; e-mail: safin@kstu.ru, almira-h@rambler.ru

Аннотация. Направление исследования – формирование представлений о структуре и свойствах композитных материалов, получаемых на основе древесины сосны, а также о процессах, происходящих в структуре древесной ткани. Изучено влияние условий баротермической обработки образцов цельной древесины сосны обыкновенной методом взрывного автогидролиза на плотность, прочностные и гидрофобные характеристики термодревесной композиции, получаемой горячим прессованием. Обработка древесины выполнена в разных условиях фактора жесткости взрывного автогидролиза – при температуре 200 °С и продолжительности процесса от 0,08 до 10 мин. Установлено, что увеличение фактора жесткости гидролиза снижает плотность гидролизованной древесины от 440 до ~350 кг/м³. При выбранных параметрах обработки не происходит фрагментации образцов. Горячее прессование гидролизованной древесины, полученной в условиях незначительной или умеренной жесткости, сопровождается линейным увеличением плотности термодревесного композитного материала от ~440 до 500 кг/м³. Следствием дальнейшего роста жесткости является замедление темпов повышения плотности композитного материала. Условная граница, определяющая достижение максимального количества сшитых межмолекулярных структур в этом материале, соответствует фактору жесткости 3000...4500 мин. Более жесткие условия обработки вызывают интенсификацию процессов термической деструкции. Зависимость гидрофобных характеристик от жесткости условий баротермической обработки носит сложный характер. При факторе жесткости 1000...3000 мин наблюдается точка экстремума, до достижения которой гидрофобные показатели материала ухудшаются. Его водопоглощение возрастает от 50 до 130 %, а разбухание – от 15 до 54 %. После достижения точки экстремума гидрофобные показатели значительно улучшаются. Водопоглощение снижается до ~20 %, разбухание – до ~10 %. Мягкие условия гидролиза не приводят к получению материала со стабильно высокими гидрофобными показателями. Обра-

зующихся сшитых структур недостаточно для формирования прочной и водостойкой композиции, вследствие чего ухудшаются гидрофобные характеристики. Возрастание жесткости гидролиза увеличивает количество активных компонентов. Образующиеся при прессовании дополнительные межмолекулярные связи улучшают гидрофобные характеристики. Полученные результаты могут быть использованы при создании моделей процессов, происходящих в структуре лигноцеллюлозного вещества при взрывном автогидролизе и получении композитных материалов, при определении оптимальных параметров баротермической обработки для изготовления композитных материалов с заданными физико-механическими характеристиками. Баротермическая обработка цельной древесины сосны методом взрывного автогидролиза способствует появлению в структуре древесной ткани химически активных компонентов, на количество которых влияет жесткость условий обработки. Свойства получаемого термодревесного композитного материала находятся в зависимости от условий процесса.

Для цитирования: Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., Сафин Р.Г., Хабибуллина А.Р. Физико-механические характеристики термодревесной композиции из древесины сосны при баротермической обработке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 143–155. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-143-155

Ключевые слова: древесина, сосна, взрывной автогидролиз, баротермическая обработка, композитный материал, термодревесная композиция, водопоглощение, разбухание по толщине, плотность, прочность.

Введение

Сосна занимает одну из лидирующих позиций среди видов, произрастающих в лесах Западной Сибири: площадь ее ареала – более 38 млн га [17]. Несмотря на то, что древесина сосны в настоящее время используется достаточно широко – прежде всего в строительстве и целлюлозно-бумажном производстве, а также в производстве мебели – потенциал этого ресурса остается по-прежнему значительным. Большинство предлагаемых сегодня методов повышения защищенности цельной древесины от проникновения влаги предусматривают нанесение защитных покрытий, препятствующих попаданию воды в межволоконное пространство, – лакокрасочных, пленочных и комбинированных [8, 18]. В целом это приводит к получению требуемого результата, но сопряжено с большими трудозатратами, расходом материальных ресурсов и, как правило, не улучшает иных характеристик материала, например не увеличивает его прочности. Теоретический и практический интерес имеют методы термомеханической и химико-механической модификации древесины. В результате тепловой, механической и/или химической обработки механические свойства цельной древесины могут быть приведены в соответствие с требованиями, предъявляемыми к материалу готового изделия из нее. Изучению возможности применения методов термомеханической и химико-механической модификации древесины посвящено множество работ [1–7, 9, 10, 24, 25], актуальных и в наши дни [19, 20, 36–39].

Целью работы является изучение особенностей воздействия на цельную древесину сосны обыкновенной перегретого пара при взрывном автогидролизе и последующем горячем прессовании гидролизованной древесины в композитный материал, который должен обладать улучшенными прочностными и приемлемыми гидрофобными характеристиками по сравнению с исходной древеси-

ной. Кроме того, варьирование условий баротермической обработки и горячего прессования позволит влиять на основные физико-механические показатели свойств материала и изменять их в достаточно широком диапазоне. Придание древесине новых качественных характеристик может расширить возможности ее применения в виде конструкционного материала, обеспечить использование в более нагруженных условиях с сохранением гидрофобных свойств.

Объекты и методы исследования

В работе использованы образцы цельной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – одной из основных пород, образующих древостой в хвойных и смешанных лесах, – выдержанной после рубки в течение 1 года в проветриваемом и неотапливаемом помещении. Отбор образцов выполнялся из ядровой части ствола с использованием ленточной пилы. Изготавливались пластины смешанного (полурадиального) среза с преобладанием тангенциальной составляющей. Размер исходных пластин составил $150 \times 50 \times (\sim)7$ мм с длинной стороной, взятой вдоль волокон. После вырезки образцы выдерживались в сухом помещении. Влажность образцов перед проведением баротермической обработки ~ 20 %. Оценка абсолютной влажности осуществлялась посредством высушивания контрольной группы образцов до стабилизации массы и определения разности их массы с массой в исходном состоянии по методике [11].

Образцы древесины подвергались баротермическому воздействию перегретого насыщенного водяного пара методом взрывного автогидролиза в лабораторном реакторе периодического действия, который традиционно используется для обработки предварительно измельченных лигноцеллюлозных материалов в целях получения на их основе целлюлозы, топливных гранул, биоэтанола, животных кормов и др. [28, 29, 34]. В данном случае обработке подвергались образцы цельной древесины. При этом условия обработки выбирались так, чтобы в процессе автогидролиза и последующего резкого сброса давления не происходило их фрагментирования. Температура обработки образцов составляла 200 °С, продолжительность обработки – от 0,08 до 10 мин. Фактор жесткости (R_0) процесса взрывного автогидролиза, определяется в соответствии с зависимостью [26, 32, 33, 35]:

$$R_0 = \tau e^{\frac{T-100}{14,75}},$$

где τ – продолжительность процесса, мин, $\tau = 73 \dots 13\ 200$ мин; T – температура процесса обработки, °С.

После баротермической обработки полученные образцы гидролизованной древесины подвергались сушке в естественных условиях отапливаемого помещения до комнатно-сухой степени влажности (10...18 %), определяемой после стабилизации массы.

Гидролитические процессы, происходящие в структуре растительной ткани при обработке перегретым паром, способствуют появлению в составе материала компонентов, способных вступать в реакцию с образованием прочных межмолекулярных связей. Вопросы получения композитных материалов из гидролизованного лигноцеллюлозного вещества изучались и изучаются достаточно широко [27, 30, 31]. Высушенные образцы

гидролизованной древесины сосны помещались в разборную пресс-форму и подвергались плоскостному горячему прессованию при температуре 120 °С и давлении прессования 4,0 МПа. Нагрев и прессование были проведены в целом по следующей методике. После помещения образца в пресс-форму осуществлялся ее нагрев с одновременной установкой требуемого давления. В процессе увеличения температуры поддерживалось целевое значение давления. После достижения температуры, отличающейся от целевой в меньшую сторону на 5...7 °С, нагрев прекращался, температура образца при этом продолжала расти из-за инертности системы, достигая через несколько минут целевого значения $\pm 1,5$ °С. Образец выдерживался при заданных давлении и температуре в течение 3 мин, после чего следовало снятие давления и постепенное охлаждение пресс-формы с образцом до температуры 30...35 °С. Общая продолжительность цикла обработки образцов гидролизованной древесины от момента их размещения в пресс-форме до охлаждения составляла 25...35 мин.

Поликонденсационные процессы, имеющие место при горячем прессовании гидролизованной древесины, приводят к уплотнению материала за счет появления сшитых межмолекулярных структур [23, 40]. Физико-механические свойства древесины после баротермической обработки и горячего прессования существенно отличаются от показателей исходной древесины.

Для всех образцов гидролизованной древесины, а также не подвергнутых баротермической обработке контрольных найдена плотность по методике [12]. Для образцов термодревесной композиции, полученных в результате горячего прессования гидролизованной древесины, по стандартным методикам [12, 16] определены прочность при статическом изгибе на испытательной машине, соответствующей требованиям [15], а также водопоглощение и разбухание по толщине за 24 ч. Взвешивание образцов выполнялось на лабораторных весах, отвечающих требованиям [13], с погрешностью $\pm 0,1$ %. Измерение толщины проводилось микрометром [14] с погрешностью $\pm 0,01$ мм. Все измерения осуществлены при комнатной температуре.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1, а представлена зависимость плотности образцов древесины сосны, подвергнутой баротермической обработке, от жесткости процесса. Данные образцы не подвергались горячему прессованию после гидролиза, но были предварительно высушены до влажностного содержания $\sim 10...18$ %. Прослеживается тенденция закономерного уменьшения плотности гидролизованной древесины с увеличением жесткости процесса ее обработки паром. Зависимость является убывающей по экспоненциальному закону второго порядка.

Следует отметить существенные отличия в плотности образцов древесины, гидролизованной в условиях, достаточно близких к значениям жесткости до 2000 мин. Здесь и далее некоторое увеличение плотности отдельных образцов при более высоких значениях жесткости, вероятно, следует считать результатом действия случайных факторов, обусловленных структурной неоднородностью древесной ткани подвергнутых испытаниям образцов. Даже взятые из одного ствола и в одинаковых условиях, они отличаются друг от друга по наличию и количеству внутренних дефектов, зон уплотнения, их размеру и др.

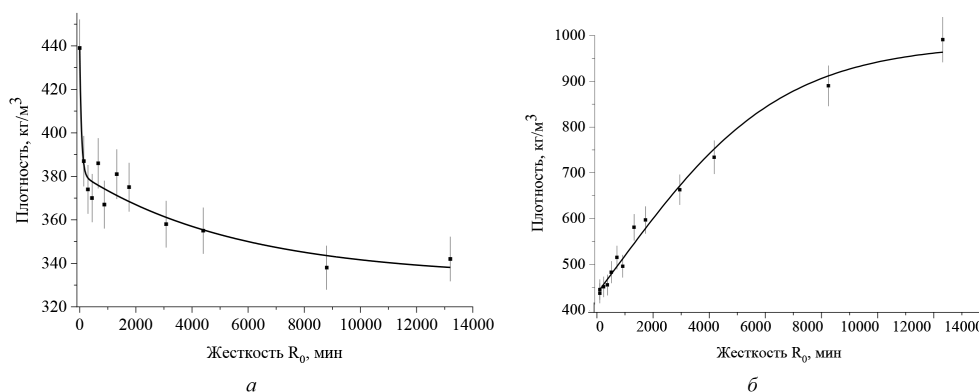


Рис. 1. Зависимость плотности от жесткости баротермической обработки: *a* – гидролизованная древесина сосны (непрессованный материал); *б* – термодревесная композиция из древесины сосны

Fig. 1. Dependence of pine samples density on rigidity factor of barothermal treatment: *a* – hydrolyzed pine wood (non-pressed material); *b* – pine thermowood composition

При этом однозначно прослеживается тенденция к уменьшению плотности при увеличении жесткости гидролиза. Представленные результаты позволяют сделать вывод, что баротермическая обработка древесины сосны при жесткости процесса 73...4400 мин приводит к значительным деструктивным изменениям в ее морфологической структуре. Гидролиз даже в мягких условиях снижает плотность древесного вещества более чем на 10 %, что свидетельствует о появлении значительного количества пор в межволоконном пространстве такого материала. Дальнейшее увеличение жесткости условий обработки сопровождается уменьшением плотности, но интенсивность этого процесса значительно снижается. Следствием является уменьшение плотности древесной ткани до 25 % по сравнению с исходной древесиной.

Горячее прессование гидролизованной древесины сопровождается ее значительным уплотнением, вызываемым размягчением компонентов древесной ткани, а также процессами химической сшивки с образованием межмолекулярных связей [23]. С увеличением жесткости условий баротермической обработки отмечается неравномерное возрастание плотности образцов получаемого материала с тенденцией к «насыщению» (рис. 1, *б*). Зависимость носит экспоненциальный характер и описывается экспоненциальным законом.

Из рис. 1, *б* видно, что горячее прессование гидролизованной древесины, полученной в условиях незначительных или умеренных значений жесткости (до 4 000...5 000 мин), приводит к практически линейному увеличению плотности термодревесного материала. Следствием дальнейшего повышения жесткости процесса является замедление темпов роста плотности с переходом к области условного «насыщения». Следует предположить, что обработка древесины при жесткости, превышающей 10 000 мин, не приведет к заметному увеличению плотности материала. Это можно объяснить тем, что баротермическая обработка вплоть до $R_0 = 4\ 000...6\ 000$ мин постепенно увеличивает количество активных групп, участвующих в поликонденсационных процессах при горячем прессовании. Морфологическая структура древесной ткани при этом существенно разрушается, о чем свидетельствует значительное изменение

плотности таких образцов непосредственно после баротермической обработки даже в мягких условиях (см. рис. 1, *a*).

В условиях, когда $R_0 < 3000$ мин, интенсивность процессов сшивки максимальна. Дальнейшее увеличение R_0 способствует интенсификации процессов деструкции лигнина, сопровождаемых деградацией древесной ткани. Однако деструктивные процессы еще не доминируют над процессами сшивки компонентов, хотя и существенно их замедляют. Подтверждением может служить характер зависимости от R_0 прочностных характеристик материала (рис. 2).

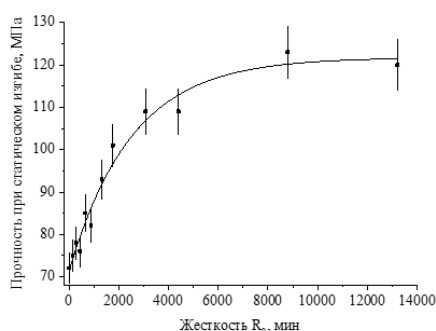


Рис. 2. Зависимость прочности при изгибе термодревесной композиции из древесины сосны от жесткости баротермической обработки

Fig. 2. Dependence of bending strength of a pine thermowood composition on rigidity factor of barothermal treatment

Аналогично плотности, при увеличении R_0 происходит повышение прочностных характеристик. Однако данная зависимость имеет несколько иной характер. Интенсивный рост прочности наблюдается приблизительно до $R_0 = 3000 \dots 4000$ мин, после чего данный показатель возрастает незначительно, в то время как плотность продолжает увеличиваться (см. рис. 1, *b*). Вероятно, что значение R_0 в $3000 \dots 4500$ мин определяет условную границу, после достижения которой количество сшитых межмолекулярных структур в материале становится близким к максимальному. Более жесткие условия обработки интенсифицируют процесс деструкции морфологической структуры древесной ткани, постепенно замедляя в ней образование новых реакционноспособных групп. На практике это означает, что баротермическая обработка древесины сосны для получения на ее основе термодревесной композиции нецелесообразна при $R_0 > 4500$ мин.

Следующим этапом стал анализ гидрофобных характеристик материала. На рис. 3 представлены показатели его водопоглощения и разбухания по толщине за 24 ч. Обе зависимости имеют сложный характер. С увеличением жесткости процесса баротермической обработки до $R_0 = 1000$ мин наблюдается резкое возрастание как водопоглощения, так и разбухания по толщине. При $R_0 = 1000 \dots 2000$ мин водопоглощение и при $R_0 \approx 3000$ мин разбухание по толщине достигают максимума, превышая аналогичные показатели для исходной древесины в 3–5 раз. Следствием дальнейшего увеличения R_0 является значительное улучшение гидрофобных показателей.

Очевидно, что гидрофобные характеристики композиционных материалов на основе древесины обусловлены прежде всего наличием пустот, количество и объем которых определяют плотность материала. Как правило, водопоглощение и разбухание подобных материалов находятся в линейной зависимости от нее [21, 22]. Однако в нашем случае этого не наблюдается (рис. 4).

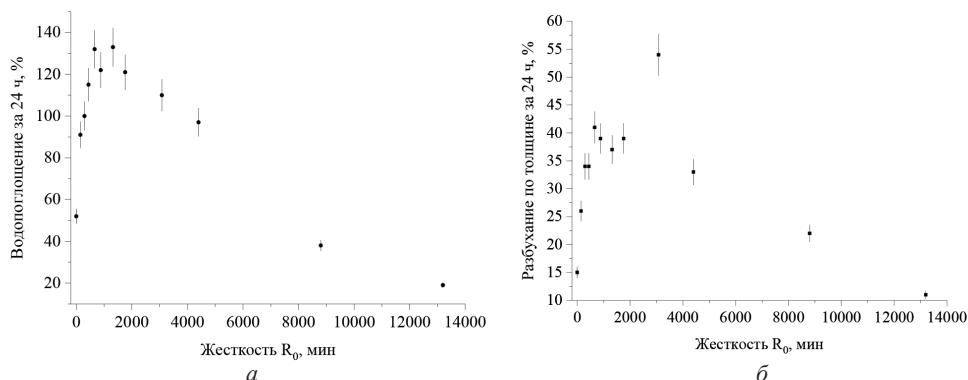


Рис. 3. Зависимость водопоглощения (а) и разбухания по толщине (б) за 24 ч термодревесной композиции из древесины сосны от жесткости баротермической обработки

Fig. 3. Dependence of water absorption (a) and thickness swelling (b) for 24 hours of a pine thermowood composition on rigidity factor of barothermal treatment

Подобное поведение материала может иметь следующее объяснение. В мягких условиях гидролитического воздействия изменения, происходящие в молекулярной структуре древесного вещества, не приводят к появлению в нем значительного количества реакционноспособных компонентов. Горячее прессование такой древесины сопровождается ее механическим уплотнением. Однако образующихся при протекании поликонденсационных процессов сшитых структур оказывается недостаточно для формирования прочной композиции, способной противостоять воздействию воды. Погруженный в воду материал начинает впитывать ее подобно первоначально сжатой губке, следствием чего и является увеличение водопоглощения и разбухания по толщине при росте плотности термодревесной композиции. Когда фактор жесткости превышает пороговое значение ($R_0 = 1500...2000$ мин), количество активных компонентов в древесине увеличивается настолько, что образующиеся при прессовании межмолекулярные связи становятся способны удерживать целостность структуры материала, препятствуя процессам водопоглощения и разбухания. Зависимость гидрофобных свойств от плотности перестает быть аномальной (правые части на рис. 4).

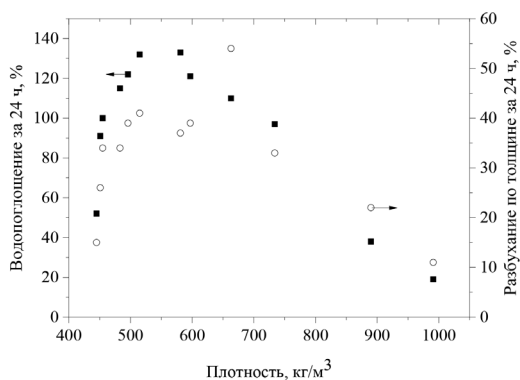


Рис. 4. Зависимость водопоглощения и разбухания по толщине за 24 ч термодревесной композиции из древесины сосны от ее плотности (■ – водопоглощение, ○ – разбухание по толщине)

Fig. 4. Dependence of water absorption and thickness swelling for 24 hours of a pine thermowood composition on its density (■ – water absorption, ○ – thickness swelling)

Характерно, что прочностные характеристики материала достигают своих максимальных значений при $R_0 > 3000$ мин.

Таким образом, баротермическая обработка древесины сосны методом взрывного автогидролиза с последующим горячим прессованием обеспечивает получение термодревесного композитного материала со значительно измененными по сравнению с исходной древесиной показателями физико-механических свойств. В процессе длительной выдержки изготовленных образцов в комнатных условиях прослеживается сохранение их стабильной формы и размеров. В условиях значительного увлажнения при погружении в водную среду отмечается существенная деформация материала по толщине, обусловленная разбуханием. Некоторые сравнительные характеристики исходной древесины сосны, а также термодревесного композитного материала, полученного на ее основе, представлены в таблице.

Сравнительные характеристики исходной древесины сосны и термодревесного композитного материала, полученного на ее основе

№	Метод обработки	Жесткость, мин	Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Прочность при статическом изгибе, МПа	Водопоглощение за 24 ч, %	Разбухание по толщине за 24 ч, %
1	Без обработки	–	20±3	435±21,8	80±4,0	44±2,4	8±0,6
2	Горячее прессование	0	14±4	445±22,2	72±3,6	52±2,9	15±1,1
3	Гидролиз, горячее прессование	146	14±4	451±22,5	75±3,8	91±5,0	26±1,8
4		293		455±22,7	78±3,9	100±5,5	34±2,4
5		440		483±24,1	76±3,8	115±6,3	34±2,4
6		660		515±25,7	85±4,3	132±7,3	41±2,9
7		880		496±24,8	82±4,1	122±6,7	39±2,7
8		1320		581±29,0	93±4,7	133±7,3	37±2,6
9		1760		597±29,9	101±5,1	121±6,7	39±2,7
10		3080		663±33,1	109±5,5	110±6,1	54±3,8
11		4400		734±36,7	109±5,5	97±5,3	33±2,3
12		8800		890±44,5	123±6,2	38±2,1	22±1,5
13		13200		991±49,6	120±6,0	19±1,0	11±0,8

Заключение

Баротермическая обработка древесины сосны в среде насыщенного пара, сопровождаемая взрывной декомпрессией системы, вызывает гидролитические и структурно-деструктивные изменения в ее ткани. При этом наблюдается тенденция к уменьшению плотности древесины с увеличением жесткости (R_0) баротермического процесса. Горячее прессование гидролизованной древесины приводит к ее значительному уплотнению, степень которого, помимо условий прессования, определяется температурой и продолжительностью баротермического воздействия. Результатом горячего прессования гидролизованной древесины сосны является получение композитного материала, плотность и прочность которого характеризуются областью условного насыщения, по до-

стижению которой существенного увеличения данных показателей с повышением R_0 не происходит. Для плотности показатель «насыщения» соответствует $R_0 \sim 8000$ мин, для прочности при изгибе ~ 3000 мин. Обнаружено ухудшение гидрофобных показателей получаемой термодревесной композиции с увеличением R_0 до ~ 2000 мин. Следствием дальнейшего роста R_0 является существенное снижение водопоглощения и разбухания по толщине, обусловленное увеличением числа межмолекулярных связей, формируемых в поликонденсационных процессах при горячем прессовании гидролизованного древесного вещества. Пропорционально повышению плотности материала происходит снижение его водопоглощения. Между данными параметрами наблюдается линейная зависимость. При $R_0 > 2500$ мин резко снижаются прочностные характеристики древесины, связанные с интенсификацией процессов термической и гидролитической деструкции, их доминированием над образованием химических связей между компонентами древесного комплекса.

Баротермическая обработка древесины сосны для получения на ее основе термодревесной композиции с оптимальными физико-механическими характеристиками целесообразна при жесткости процесса 3000...5000 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 157092 СССР, МПК В 27d. Способ изготовления, например, элементов мебели путем горячего прессования пакета: № 774921/29-14: заявл. 20.04.1962: опубл. 01.01.1963 / З.Р. Балтпурвиньш, Г.В. Берзиньш, Ф.А. Шнюцинъ, А.П. Николаев, Э.А. Микит, И.Я. Зелтынъ, М.А. Экс. [Baltpurvin'sh Z.R., Berzin' G.V., Shnyutsin' F.A., Nikolayev A.P., Mikit E.A., Zeltyn' I.Ya., Eks M.A. *A Method of Manufacturing, for Example, Furniture Items by Hot Pressing a Package*. Certificate of Authorship USSR no. SU 157092 A1, 1963].

2. А. с. 251818 СССР, МПК В 29j. Способ получения древесных пластиков: № 1132829/29-33: заявл. 13.02.1967: опубл. 06.01.1970 / Г.В. Берзиньш, М.С. Мовнин, А.И. Калниньш, Э.Я. Слагис, Н.А. Модин, Я.К. Гулбис, З.Р. Балтпурвиньш, А.З. Зиемелис. [Berzin'sh G.V., Movnin M.S., Kalnin'sh A.I., Slagis E.Ya., Modin N.A., Gulbis Ya.K., Baltpurvin'sh Z.R., Ziyemelis A.Z. *Method for Producing Wood Plastics*. Certificate of Authorship USSR no. SU 251818 A1, 1970].

3. А. с. 313675 СССР, МПК В 27m 1/02. Способ изготовления уплотненной древесины: № 1389620/29-33: заявл. 30.12.1969: опубл. 07.09.1971 / М.С. Мовнин, Н.А. Модин, А.Н. Ерошкин, А.Г. Ермолович, Г.В. Берзиньш. [Movnin M.S., Modin N.A., Eroshkin A.N., Ermolovich A.G., Berzin'sh G.V. *Method for Manufacturing Densified Wood*. Certificate of Authorship USSR no. SU 313675 A1, 1971].

4. А. с. 315610 СССР, МПК В 27m 3/04. Способ изготовления торцевой шашки: № 1397927/29-33: заявл. 05.01.1970: опубл. 01.10.1971 / М.С. Мовнин, А.Н. Ерошкин, Н.А. Модин, В.Я. Капустин, Е.И. Швец, Ю.Н. Файнгольд. [Movnin M.S., Eroshkin A.N., Modin N.A., Kapustin V.Ya., Shvets E.I., Fayngol'd Yu.N. *Method for Manufacturing a Wood Block*. Certificate of Authorship USSR no. SU 315610 A1, 1971].

5. А. с. 370050 СССР, МПК В 27m 1/02. Способ уплотнения древесины: № 1687605/29-33: заявл. 12.07.1971: опубл. 15.02.1973 / М.С. Мовнин, Н.А. Модин, А.Н. Ерошкин, Л.И. Янговский, А.Б. Израелит, М.П. Янговская. [Movnin M.S., Modin N.A., Eroshkin A.N., Yantovskiy L.I., Izrayelit A.B., Yantovskaya M.P. *Wood Densification Method*. Certificate of Authorship USSR no. SU 370050 A1, 1973].

6. А. с. 493716 СССР, МПК G 01n 25/56. Способ определения оптимальной температуры горячего прессования древесных пластиков: № 2003887/26-25: заявл.

11.03.1974; опубл. 30.11.1975 / В.В. Желдакова, В.Н. Петри. [Zheldakova V.V., Petri V.N. *Method for Determining the Optimum Temperature for Hot Pressing of Wood Plastics*. Certificate of Authorship USSR no. SU 493716 A1, 1975].

7. А. с. 931499 СССР, МПК В 44 С 1/24. Способ получения декоративного изображения на поверхности древесного изделия: № 2996524/28-12: заявл. 14.07.1980; опубл. 30.05.1982 / А.Г. Ермолович. [Ermolovich A.G. *A Method of Producing a Decorative Image on the Surface of a Wood Product*. Certificate of Authorship USSR no. SU 931499 A1, 1982].

8. Буглай В.М. Технология отделки древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 304 с. [Buglay V.M. *Technology of Wood Fashioning*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 304 p.].

9. Винник Н.И. Модифицированная древесина. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 160 с. [Vinnik N.I. *Modified Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 160 p.].

10. Винник Н.И., Корыстин Л.Н. Промышленное производство пресованной древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1964, 140 с. [Vinnik N.I., Korystin L.N. *Industrial Production of Pressed Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 140 p.].

11. ГОСТ 16483.7–71. Древесина. Методы определения влажности (с изменениями № 1–3). М.: Стандартиформ, 2006. 5 с. [State Standard. *GOST 16483.7–71. Wood. Methods for Determination of Moisture Content*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 5 p.].

12. ГОСТ 19592–80. Плиты древесноволокнистые. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1987. 15 с. [State Standard. *GOST 19592–80. Fibre Boards. Test Methods*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1987. 15 p.].

13. ГОСТ 24104–2001. Весы лабораторные. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 2002. 11 с. [State Standard. *GOST 24104–2001. Laboratory Scales. General Technical Requirements*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002. 11 p.].

14. ГОСТ 6507–90. Микрометры. Технические условия (с изменением № 1). М.: Изд-во стандартов, 2004. 21 с. [State Standard. *GOST 6507–90. Micrometers. Specifications*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2004. 21 p.].

15. ГОСТ 7855–84. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Типы. Основные параметры. Общие технические требования (с изменениями № 1, 2). М.: Изд-во стандартов, 1990. 12 с. [State Standard. *GOST 7855–84. Tensile Testing Machines and Universal Testing Machines for Static Tests of Metals and Structural Plastics. Types. Main Parameters. General Technical Requirements*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1990. 12 p.].

16. Грибенчикова А.В. Материаловедение в производстве древесных плит и пластиков. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 120 с. [Gribenchikova A.V. *Materials Science in the Production of Wood-Based Panels and Plastics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 120 p.].

17. Леса СССР. Т. 4: Леса Урала, Сибири и Дальнего Востока / гл. ред. А.Б. Жуков. М.: Наука, 1969. 768 с. [Forests of the USSR. Vol. 4. Forests of the Urals, Siberia and the Far East. Editor-in-Chief A.B. Zhukov. Moscow, Nauka Publ., 1969. 768 p.].

18. Прието Дж., Кине Ю. Древесина. Обработка и декоративная отделка. М.: Пэйнт-медиа, 2008. 392 с. [Prieto J., Kiene J. *Holzbeschichtung: Chemie und Praxis* [Wood Coatings]. Translated from German. Moscow, Paint-Media Publ., 2008. 392 p.].

19. Просвириков Д.Б., Сафин Р.Г., Садртдинов А.Р. Технология паровзрывной обработки лигноцеллюлозных материалов: моногр. Казань: Изд-во КНИТУ, 2015. 139 с. [Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Sadrtidinov A.R. *Technology of Steam Blasting of Lignocellulosic Materials*: Monograph. Kazan, KSTU Publ., 2015. 139 p.].

20. Сафин Р.Г., Просвириков Д.Б., Тимербаев Н.Ф. Разработка технологии получения химических волокон из растительного целлюлозосодержащего сырья // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 3(375). С. 68–74. [Safin R.G., Prosvirnikov D.B., Timerbaev N.F. Development of Technology for Obtaining Chemical

Fibers from Plant Cellulose-Containing Raw Materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology], 2018, vol. 3(375), pp. 68–74.].

21. Скурыдин Ю.Г. Структура и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2000. 147 с. [Skurydin Yu.G. *Structure and Properties of Composite Materials Obtained from Wood Wastes after Explosive Hydrolysis*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2000. 147 p.].

22. Скурыдина Е.М. Разработка технологии композиционных материалов на основе древесины и полимерных наполнителей: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2006. 170 с. [Skuridina E.M. *Development of the Technology of Composite Materials Based on Wood and Polymer Fillers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2006. 170 p.].

23. Старцев О.В., Салин Б.Н., Скурыдин Ю.Г. Баротермический гидролиз древесины в присутствии минеральных кислот // Докл. АН. Химическая технология. 2000. Т. 370, № 5. С. 638–641. [Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal Hydrolysis of Wood in Presence of Mineral Acids. *Doklady Akademii Nauk. Khimicheskaya tekhnologiya* [Doklady Chemistry], 2000, vol. 370, no. 5, pp. 638–641].

24. Хрулев В.М. Модифицированная древесина в строительстве. М.: Стройиздат, 1986. 112 с. [Khrulev V.M. *Modified Wood in Construction*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 112 p.].

25. Шейдин И.А., Пюдин П.Э. Технология производства древесных пластиков и их применение. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 264 с. [Sheyidin I.A., Pyudin P.E. *Wood Plastics Production Technology and Their Application*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 264 p.].

26. Abatzoglou N., Chornet E., Belkacemi K., Overend R.P. Phenomenological Kinetics of Complex Systems: The Development of a Generalized Severity Parameter and Its Application to Lignocellulosics Fractionation. *Chemical Engineering Science*, 1992, vol. 47, iss. 5, pp. 1109–1122. DOI: [10.1016/0009-2509\(92\)80235-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(92)80235-5)

27. Anglès M.N., Ferrando F., Farriol X., Salvadó J. Suitability of Steam Exploded Residual Softwood for the Production of Binderless Panels. Effect of the Pre-Treatment Severity and Lignin Addition. *Biomass and Bioenergy*, 2001, vol. 21, iss. 3, pp. 211–224. DOI: [10.1016/S0961-9534\(01\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00031-9)

28. Asada C., Sasaki C., Uto Y., Sakafuji J., Nakamura Y. Effect of Steam Explosion Pretreatment with Ultra-High Temperature and Pressure on Effective Utilization of Softwood Biomass. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, vol. 60, pp. 25–29. DOI: [10.1016/j.bej.2011.09.013](https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.09.013)

29. Ewanick S., Bura R. Hydrothermal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Bioalcohol Production*. Ed. by K. Waldron. Oxford, Woodhead, 2010, pp. 3–23. DOI: [10.1533/9781845699611.1.3](https://doi.org/10.1533/9781845699611.1.3)

30. Focher B., Marzetti A., Beltrame P.L., Avella M. Steam Exploded Biomass for the Preparation of Conventional and Advanced Biopolymer-Based Materials. *Biomass and Bioenergy*, 1998, vol. 14, iss. 3, pp. 187–194. DOI: [10.1016/S0961-9534\(97\)10046-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10046-0)

31. Halvarsson S., Edlund H., Norgren M. Manufacture of Non-Resin Wheat Straw Fibreboards. *Industrial Crops and Products*, 2009, vol. 29, iss. 2-3, pp. 437–445. DOI: [10.1016/j.indcrop.2008.08.007](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.08.007)

32. Heitz M., Capek-Ménard E., Koeberle P.G., Gagné J., Chornet E., Overend R.P., Taylor J.D., Yu E. Fractionation of *Populus tremuloides* at the Pilot Plant Scale: Optimization of Steam Pretreatment Conditions Using the STAKE II Technology. *Bioresource Technology*, 1991, vol. 35, iss. 1, pp. 23–32. DOI: [10.1016/0960-8524\(91\)90078-x](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90078-x)

33. Heitz M., Carrasco F., Rubio M., Brown A., Chornet E., Overend R.P. Physico-Chemical Characterization of Lignocellulosic Substrates Pretreated via Autohydrolysis:

An Application to Tropical Woods. *Biomass*, 1987, vol. 13, iss. 4, pp. 255–273. DOI: [10.1016/0144-4565\(87\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0144-4565(87)90063-1)

34. Muzamal M., Jedvert K., Theliander H., Rasmuson A. Structural Changes in Spruce Wood During Different Steps of Steam Explosion Pretreatment. *Holzforschung*, 2015, vol. 69, iss. 1, pp. 61–66. DOI: [10.1515/hf-2013-0234](https://doi.org/10.1515/hf-2013-0234)

35. Overend R.P., Chornet E. Fractionation of Lignocellulosics by Steam Aqueous Pretreatments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1987, vol. 321, no. 1561, pp. 523–536. DOI: [10.1098/rsta.1987.0029](https://doi.org/10.1098/rsta.1987.0029)

36. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Akhmetshin I.R., Taimarov M.A., Timerbaev N.F. Mechanization of Continuous Production of Powdered Cellulose Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 221, art. 012010. DOI: [10.1088/1757-899X/221/1/012010](https://doi.org/10.1088/1757-899X/221/1/012010)

37. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Zakirov S.R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 773–778. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773)

38. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Ziatdinova D.F., Timerbaev N.F., Sadrtidinov A.R. Modeling of Delignification Process of Activated Wood and Equipment for Its Implementation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 221, art. 012009. DOI: [10.1088/1757-899X/221/1/012009](https://doi.org/10.1088/1757-899X/221/1/012009)

39. Skurydin Yu.G., Skuridina E.M. Physical and Mechanical Characteristics of the Thermal-Wood Composition from Hydrolyzed Birch Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. 012066. DOI: [10.1088/1755-1315/316/1/012066](https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012066)

40. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Y.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. Physical Properties and Molecular Mobility of New Wood Composite Plastic “Thermobalite”. *Wood Science and Technology*, 1999, vol. 33, I. 1, pp. 73–83. DOI: [10.1007/s002260050100](https://doi.org/10.1007/s002260050100)

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A PINE THERMOWOOD COMPOSITION DURING BAROTHERMAL TREATMENT

Yuri G. Skurydin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>

Elena M. Skurydina², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>

Rushan G. Safin³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

Almira R. Khabibulina³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-5176-2021](https://orcid.org/0000-0002-0762-8816), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0762-8816>

¹Altai State University, prosp. Lenina, 61, Barnaul, 656049, Russian Federation; e-mail: skur@rambler.ru

²Altai State Pedagogical University, ul. Molodezhnaya, 55, Barnaul, 656031, Russian Federation; e-mail: skudem@rambler.ru

³Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; e-mail: safin@kstu.ru

Abstract. The studies are aimed at forming ideas on the structure and properties of composite materials obtained from pine wood and the processes occurring in the structure of wood tissue. The article presents the data on the influence of the conditions of barothermal treatment of pine wood samples by the method of explosive autohydrolysis on the properties of a thermowood composition. The composite material is obtained by hot pressing. The influence on density,

strength and hydrophobic characteristics was studied. A series of samples was made under different conditions of the explosive autohydrolysis rigidity factor; at a temperature of 200 °C and the process duration from 0.08 to 10 min. All samples of composite material were obtained without the use of additional components. It was found that the increase in the hydrolysis rigidity factor leads to a decrease in the density of hydrolyzed wood from 440 to ~350 kg/m³. There is no fragmentation of wood samples with the selected processing parameters. Hot pressing of hydrolyzed wood obtained under conditions of low or moderate rigidity is accompanied by a linear increase in the density of the thermowood composite material from ~440 to 500 kg/m³. The consequence of a further increase in the rigidity factor is a slowdown in the rate of increase in the density of the composite material. The conditional boundary that determines the achievement of the maximum number of cross-linked intermolecular structures in the composite material corresponds to the rigidity factor of 3000–4500 min. More rigid processing conditions cause intensification of thermal degradation processes. The dependence of hydrophobic characteristics on the rigidity of the barothermal treatment conditions is complex. At the rigidity factor of 1000–3000 min, an extreme point is observed, before which the hydrophobic properties of the material deteriorate. Its water absorption and swelling increase from 50 to 130 % and from 15 to 54 %, respectively. The hydrophobic performance is significantly improved after reaching the extreme point. Water absorption and swelling reduce to ~20 % and ~10 %, respectively. Mild hydrolysis conditions do not result in a material with consistently high hydrophobic properties. The cross-linked structures are not enough to form a strong and water-resistant composition, and as a consequence, the hydrophobic characteristics deteriorate. Increasing the value of the hydrolysis rigidity factor increases the number of active components. Additional intermolecular bonds formed during pressing improve hydrophobic characteristics. The obtained results can be used in the creation of models of processes occurring in the structure of lignocellulose substance during explosive autohydrolysis and in the preparation of composite materials based on it. Optimal parameters of barothermal treatment for obtaining composite materials with specified physical and mechanical characteristics can be determined. Barothermal treatment of solid pine wood by explosive autohydrolysis contributes to the occurrence of chemically active components in the structure of wood tissue. Their number depends on the rigidity of the processing conditions. The properties of the resulting thermowood composition depend on the conditions of explosive autohydrolysis.

For citation: Skurydin Yu.G., Skurydina E.M., Safin R.G., Khabibulina A.R. Physical and Mechanical Characteristics of a Pine Thermowood Composition during Barothermal Treatment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 143–155. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-143-155

Keywords: wood, pine, explosive autohydrolysis, barothermal treatment, composite material, thermowood composition, water absorption, thickness swelling, density, strength.

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

Поступила 09.12.19 / Received on December 9, 2019

УДК 674.05:620.16

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-156-168

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДРЕВЕСНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ МАШИН

Г.А. Пилюшина, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>

П.Г. Пыриков, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAR-1011-2020](https://orcid.org/0000-0003-2338-7458)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-7458>

Е.А. Памфилов, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>

А.Я. Данилюк, аспирант

В.В. Капустин, аспирант; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>

Брянский государственный технический университет, б-р 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск, Россия, 241035; e-mail: rector@tu-bryansk.ru, pyrikovpg@mail.ru

Аннотация. Работоспособность подшипников скольжения в лесопромышленных машинах и оборудовании в значительной мере определяется грузоподъемностью и антифрикционными качествами, зависящими от несущей способности материала втулки (вкладыша), жесткости конструкции и характера усилий при эксплуатации. При этом в материалах подшипников происходят циклические изменения состояния материала втулки, а также элементов, обеспечивающих армирующие, теплопроводящие и противоизносные функции. Отражены результаты исследований напряженно-деформационного состояния анизотропных композиционных материалов в конструкциях древесно-металлических подшипников скольжения. Предложен способ обеспечения виброустойчивости, основывающийся на поддержании изменяющихся в ходе изнашивания демпфирующих свойств опоры. Описан функционал разработанной программы, с помощью которой решаются контактная и тепловая задачи при проектировании подшипников скольжения. Создан и исследован древесно-металлический материал для изготовления вкладышей и втулок подшипников из клееных композиций, в состав которых входит вибропоглощающая мелкофракционная составляющая, находящаяся в вибровзвешенном состоянии, и неоднородная по толщине втулки слоистая структура, характеризующаяся изменяющимся модулем упругости и обеспечивающая демпфирующие свойства. Предложенная конструкция подшипника скольжения с использованием данного материала ориентирована на его применение преимущественно при ударно-циклическом нагружении, что характерно для условий эксплуатации большинства лесопромышленных машин и оборудования.

Для цитирования: Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Памфилов Е.А., Данилюк А.Я., Капустин В.В. Повышение работоспособности древесно-металлических подшипников скольжения лесопромышленных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 156–168. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-156-168

Финансирование: Проект «Исследование и создание подшипников скольжения повышенной износостойкости на основе древесно-металлических композиционных материалов» в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект № 9.10677.2018/11.12).

Ключевые слова: опора трения-скольжения, композиционный материал, контактная задача, метод конечных элементов, анизотропия, вибропоглощение, контактное давление, напряжение, деформация, износостойкость.

Введение

Работоспособность подшипников скольжения обеспечивается сохранностью смазочной пленки на поверхностях скольжения. Разрыв этой пленки происходит под действием чрезмерного поверхностного давления. При этом существенны следующие факторы: скорость скольжения, температура на контактных поверхностях и физические свойства композиционных материалов [1, 4, 11].

В значительной степени работоспособность древесно-металлических подшипников скольжения (в среднем 10 000 ч) также ограничивают ударно-вибрационные воздействия, уплотняющие антифрикционный материал втулки с его последующим разрушением усталостного характера [2, 7]. Этому предшествует ослабление посадки на вал, инициирующее автоколебания с сопутствующим проникновением продуктов износа и разного рода реагентов, оказывающих деструктивное воздействие.

При низкочастотных механических воздействиях, характерных для условий работы лесопромышленных машин, а также подъемно-транспортной механизации (транспортеров, лебедок, бревнотасок, штабелеров и др.), во втулках и вкладышах подшипников возникают необратимые остаточные деформации, вызванные повреждениями древесины на молекулярном уровне. В результате вибрационных нагрузок эти повреждения интенсифицируются и приводят к разрушению подшипников при сравнительно невысоком уровне напряжений.

Наряду с тепловыми расчетами и расчетами по термо- и влагоупругости для подшипников, изготовленных на основе древесно-металлических композиций, важно определение предельно допустимых нагрузок и напряжений с вводом допущений макроскопической или статистической гомогенности среды [4, 6, 10, 18, 21]. Для выявления механизма разрушения материалов несущих элементов подшипника (втулок и вкладышей) каждая фаза древесно-металлического композита должна отвечать условиям непрерывности векторов напряжений и перемещений по границам [12], что не представляется возможным.

Для предсказания эффективных свойств идеализированной гомогенной среды через свойства фаз и их геометрические характеристики используется процедура осреднения [8, 9]. Полученные в результате данные можно использовать в расчетах подшипников из древесно-металлического композита [13, 14]. Соотношения между эффективными свойствами и свойствами фаз лежат в основе оптимизации их конструкций.

Цель исследования – разработка программного комплекса для решения нелинейной контактной задачи и определения напряженного состояния всех элементов подшипника скольжения, в конструкции которого используются древесно-металлические компоненты.

Объекты и методы исследования

На стадии проектирования подшипников скольжения, в состав которых включены элементы из древесно-металлических композиционных материалов, принципиально важным является решение контактной и тепловой задач, что

позволит, с одной стороны, обосновать возможность применения того или иного типа подшипника в заданных условиях эксплуатации, а с другой – разработать модель конструкции подшипника, соответствующую требованиям технического задания.

В ходе решения контактной задачи для оценки грузоподъемности подшипника скольжения с применением в качестве несущих элементов (втулок) полидисперсных резко гетерогенных древесно-металлических материалов был применен разработанный коллективом авторов программный продукт DSMFEM (язык программирования – Фортран), имеющий сертификат госрегистрации.

Оценку несущей способности подшипника осуществляли в два этапа.

1. Задаются основные параметры подшипника, основанные на общих конструктивных соображениях и простейших оценках его несущей способности (как правило, по номинальным контактным давлениям, на основе простейших аналитических зависимостей).

2. Оцениваются реальные контактные давления и напряжения в конструкции подшипника на этапах «пуск-торможение» и в условиях масляного голодания (режим максимальных напряжений). Проверяется обеспечение жидкостного режима смазки и теплового режима при определенных давлении и частоте вращения вала в соответствии с ГОСТ 7902–2001 [5], важнейшим элементом которого является обоснование теплового режима работы подшипника.

Причем аналитические расчеты, выполняемые по этому ГОСТу, применяются только для металлических подшипников, не содержащих деталей сложной формы, и не всегда верны для подшипников с древесно-металлическими компонентами, поэтому некоторые положения ГОСТа требуют корректировки.

Термическое сопротивление конструкции из-за низкой теплопроводности древесных композиций сопоставимо с сопротивлением на поверхности, и все элементы в составе конструкции должны быть взаимосвязаны. Необходимые для этого расчеты в случае цилиндрических однородных подшипников можно сделать аналитически, однако для подшипников с древесными элементами (втулками, вкладышами и др.) и металлическими вставками, повышающими допустимые давления и теплопроводность, определение распределения температур и деформаций возможно только численными методами. При этом решение и тепловой, и упругой статической задачи предложено выполнять на одних и тех же конечно-элементных моделях, что упрощает процесс.

Матрица жесткости материала втулки подшипника рассчитывается как интеграл по объему конечного элемента от произведения трех матриц:

$$[K] = \int_V ([B]^T [D] [B] |J|) dV,$$

где $[B]$ – матрица градиентов, составленная из производных функций формы по глобальным координатам; T – температура; $[D]$ – матрица упругости; $|J|$ – определитель матрицы Якоби (якобиан); V – скорость.

Контактная задача для древесно-металлического подшипника скольжения сводится к решению нелинейной системы уравнений итерационным методом релаксации [3].

Для подготовки данных о подшипнике используется препроцессор (рис. 1). Пользователю предлагается выбрать тип исполнения корпуса подшипника и задать основные размеры (в мм), определяющие геометрию его элементов. Для справки в центральной части диалогового окна выводится эскиз подшипника с обозначением необходимых размеров.

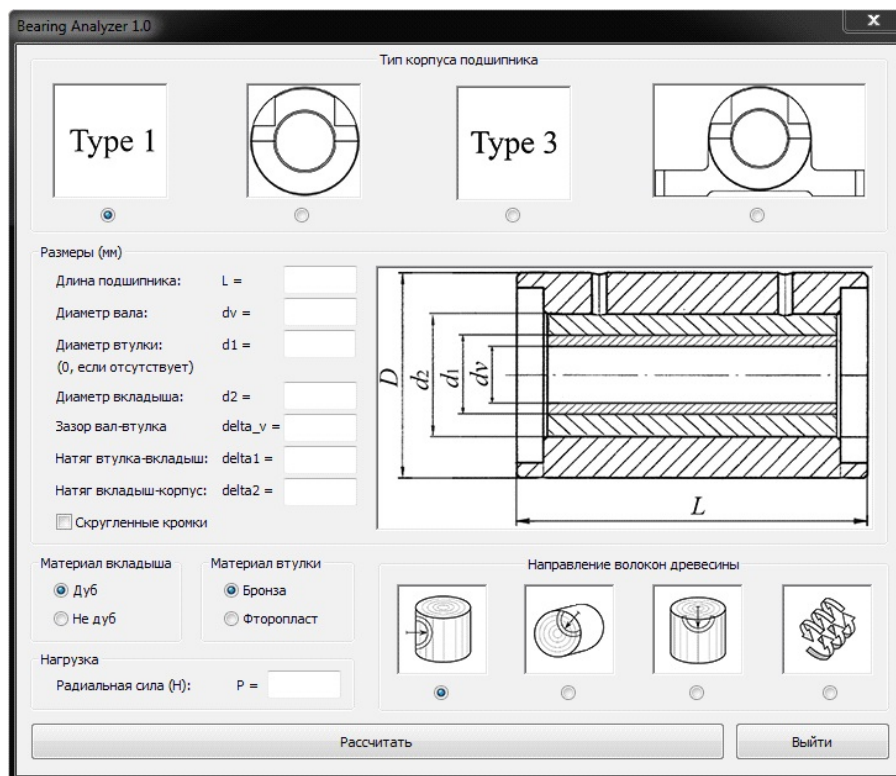


Рис. 1. Диалоговое окно ввода данных подшипника

Fig. 1. Bearing data entry form

При включении флажка «Скругленные кромки» в момент построения конечно-элементной модели формируются фаски на краях контактирующих тел для снижения краевого эффекта.

Далее выбираются материалы вкладыша и втулки и направление волокон древесины, из которой изготовлен вкладыш (в случае применения массива древесины). В качестве нагрузки на подшипник задается значение радиальной силы.

После завершения расчета данные сохраняются в текстовом файле в виде набора параметров и служат исходными для построения конечно-элементной модели подшипника.

Конечно-элементная модель подшипникового узла (рис. 2) представлена корпусом соответствующего типа, втулкой, контактирующей с валом, и вкладышем из древесно-металлического композита. Для удобства формирования модели корпус разделен на две части: цилиндрическая втулка, непосредственно контактирующая с древесным вкладышем, и сам корпус, который обеспечивает установку подшипникового узла на опоры.

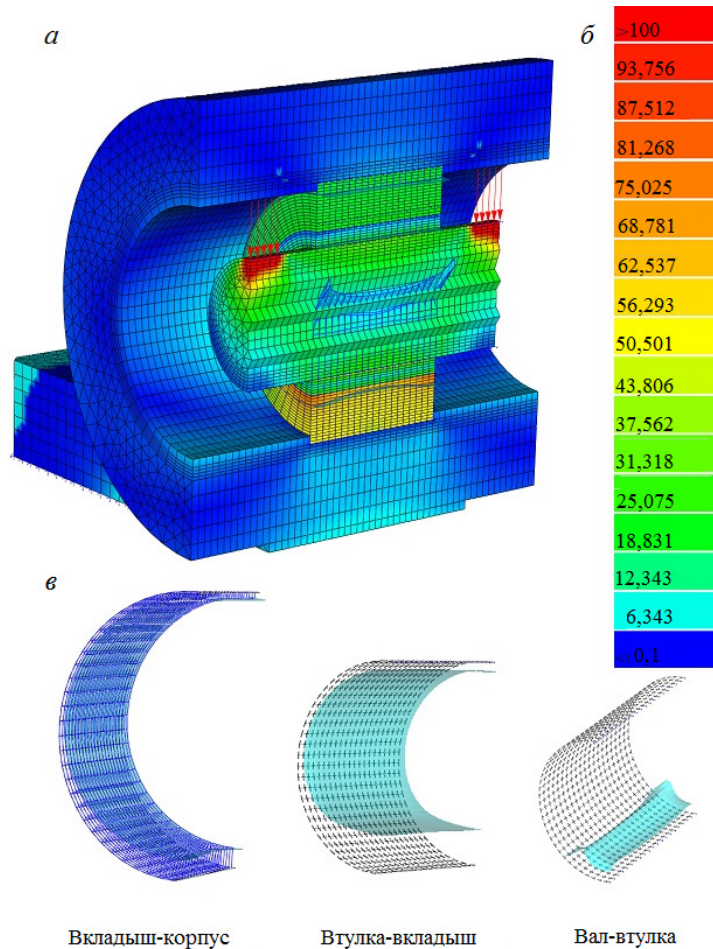


Рис. 2. Конечно-элементная модель подшипника (а) с распределением эквивалентных напряжений МПа (б), и эпюры контактных давлений на трех контактных поверхностях (в)

Fig. 2. Finite element model of the bearing (a) with the distribution of equivalent stresses (MPa) (b) and share and moment diagrams of contact pressures on three contact surfaces (c)

Между валом и втулкой задается гарантированный зазор; между остальными деталями (втулка, вкладыш и корпус) моделируется как зазор, так и натяг. Нумерация узлов (всего 120 тыс. и более) начинается от прилагаемой силы и далее – к остальным узлам послойно, что обеспечивает возможность фиксирования «истории нагружения» для учета направления сил трения.

Конечно-элементная модель подшипника с древесно-металлическим анизотропным материалом втулки (вкладыша) с учетом многослойного контакта между его составляющими формируется макросами – наборами макрокоманд, которые интерпретируются модулем создания конечно-элементной модели [16, 19]. Отдельные макросы подготовлены для создания цилиндрической втулки, вала и контакта. Описания типовых корпусов подключаются из внешних параметризованных файлов.

Внешние связи вводятся на элемент «корпус»; радиальная нагрузка приложена на концах вала.

Для идеального (строго цилиндрического и без дефектов) ствола дерева может быть принята цилиндрическая анизотропия, однако для технологически созданных элементов (вкладышей) такое описание уже несправедливо. Для сравнительно небольших по отношению к диаметру ствола размеров вкладышей можно пренебречь кривизной слоев и рассматривать древесину как ортотропный материал. При использовании более простого способа представления структуры древесины не учитывается различие упругих свойств в радиальном и тангенциальном направлениях, что позволяет допустить трансверсально-изотропную форму.

Принимая для древесины дуба в качестве главных направлений осевое (a), радиальное (r) и тангенциальное (t), запишем параметры упругости: $E_a = 14\,200$ МПа; $E_r = 1400$ МПа; $E_t = 1010$ МПа; $G_{ra} = 1420$ МПа; $G_{ta} = 980$ МПа; $G_{rt} = 470$ МПа; $\mu_{ra} = 0,43$; $\mu_{ta} = 0,41$; $\mu_{tr} = 0,83$, а из уравнений связи – соответствующие коэффициенты: $\mu_{ar} = 0,042$; $\mu_{at} = 0,029$; $\mu_{rt} = 0,599$. (E – модуль упругости древесины; G – модуль сдвига древесины; μ – коэффициент поперечной деформации древесины).

Решение контактной задачи выполнялось для 4 типов ориентации волокна древесины вкладыша относительно внешней нагрузки (рис. 3); при этом подшипник рассматривался в единой системе координат. Главные направления анизотропии вкладыша соответствовали основным направлениям. Полученная в локальной системе координат (для типа IV) матрица жесткости конечного элемента преобразовывалась к основным осям умножением на матрицу косинусов.

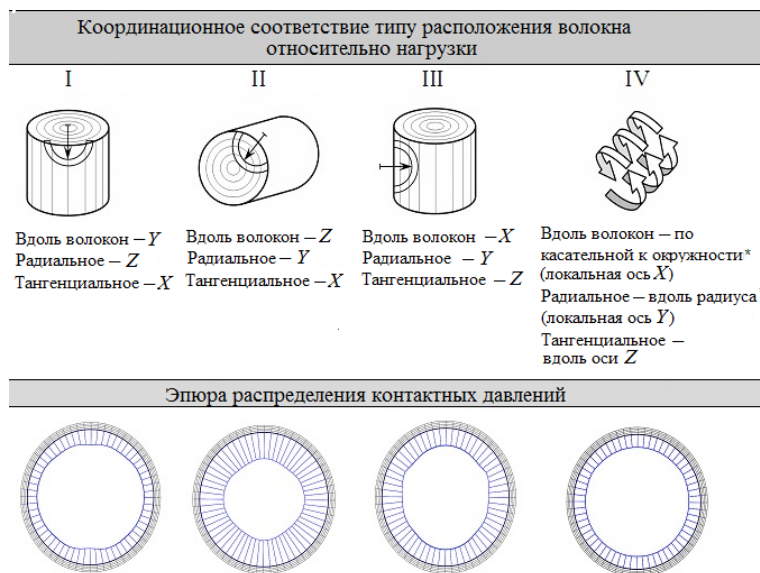


Рис. 3. Схемы расположения волокон древесины относительно внешней нагрузки во вкладышах подшипников и соответствующие им эпюры контактных давлений (*направления для каждого конечного элемента различны)

Fig. 3. Layouts of wood fibers in relation to external load in bearing inserts and their corresponding contact pressure diagrams (*directions are different for each finite element)

Как видно из рис. 3, влияние анизотропии чаще всего прослеживается на распределении контактных давлений между корпусом и вкладышем при сборке с натягом.

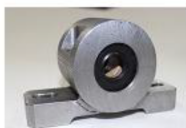
Данные о характере распределения давлений и напряжений, полученные в ходе решения контактной задачи, позволяют обосновать технологические пути создания композиционных древесно-металлических материалов, реализованные при разработке конструкций подшипников (рис. 4).



Двухслойный композиционный материал втулки в виде цельного торцового тангенциального среза массива древесины лиственных пород, пропитанный восстановленной электролитической медью. Влажность 6–8 %. Импланты – тороидные или призматические вставки, взаимодействующие с корпусом подшипника. Обеспечивают улучшенную теплопроводящую способность при повышенных скоростях. Эксплуатация с принудительной смазкой. Принцип антифрикционности основан на явлении избирательного переноса. Не содержит клеевого связующего. Не содержит сальниковых уплотнителей. Посадочный диаметр обеспечивается с допуском цилиндричности.



Материал втулки представлен древесно-металлическим слоистым композитом, состоящим из картона, армирующей металлической сетки, наполнителя с повышенными демпфирующими свойствами, находящимися в частично или полностью виброзвешенном состоянии, и не менее чем трех слоев шпона из древесины с разным модулем упругости (преимущественно ясеня, дуба, пихты). Связующее – термостойкая эпоксидная смола. Втулка несущая – медь. С принудительной смазкой. Материал разработан для использования в узлах трения с повышенными динамическими нагрузками при невысоких окружных скоростях.



Втулка из цельного массива древесины (дуб, ясень, груша) торцового (тангенциального) среза. Прессованная < 30 %. Влажность 6–8 %. Модифицирование парафином (церезином), глицерином методом «холодной-горячей» ванны. Выпускается с покрытием MoS_2 или тканевым покрытием с тефлоновыми нитями. Самосмазывающийся материал.



Двухслойный коротковолнистый композиционный материал втулки в виде древесно-металлической пресс-массы (древесная мука дуба фракции 0,13...0,25 мм, медный порошок фракции 0,045...0,450 мм, парафин) с регулируемой концентрацией древесной и металлической составляющих в зависимости от условий работы при экструдировании. Связующее – мочевиномеламиновая смола с отвердителем. Втулка несущая – фторопласт, баббит. Отличается повышенной теплопроводностью благодаря введению в состав помимо медного порошка алюминиевой пудры или уротропина (гексаметиленetetрамина). Возможно применение без несущей втулки при консистентной или капельной подаче смазочной среды. Антифрикционные добавки: графит кристаллический серебристый или скрыто-металлический (аморфный, литейный).



Рис. 4. Конструктивные решения древесно-металлических подшипников скольжения и свойства композиционных материалов втулок (вкладышей)

Fig. 4. Designs of wood-metal slide bearings and properties of composite materials of sleeves (inserts)

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных значений контактных давлений, напряжений и перемещений в анизотропном материале втулки при допущении условий эксплуатации с одновременным вращением и ударным нагружением вала сосредоточенной силой позволяет отметить характерное формоизменение, связанное с изнашиванием и обуславливающее нестабильность напряженно-деформационного состояния в подшипнике в течение наработки. Это выражается в виде образующейся со стороны торца втулки (преимущественно со стороны прилагаемой нагрузки) конусности, величина которой определяется интенсивностью и характером трибопроцессов.

При изнашивании эффективная площадь контакта втулки с валом становится меньше на величину высоты конуса износа; соответственно возрастает длина не опертой (консольной) части вала, в которой амплитуда колебаний превышает предельно допустимый зазор. Кроме того, изменяется момент инерции сечения втулки и собственная частота колебаний системы «вал– втулка», следствием чего является ухудшение демпфирующей способности опоры в целом, проявляющееся в возрастании амплитуды колебаний консольной части вала.

Диссипируемая энергия колебаний расходуется на внутреннее трение в материалах деталей подшипника, а также на внешнее трение между его составляющими элементами; оставшаяся энергия полностью реализуется в форме свободных колебаний. При этом ширина резонанса и энергетический потенциал системы (разница между запасенной и расходуемой в период колебаний энергией) определяются, в частности, добротностью материала втулки.

Учитывая, что добротность системы обусловлена реологическими необратимыми процессами пластического оттеснения, происходящими в материале втулки в ходе изнашивания, можно принять следующее допущение: от прирабатываемости и износостойкости материала втулки зависит скорость развития колебательных процессов. При этом повышение добротности сопровождается снижением демпфирующей способности подшипника.

Таким образом, величина износа втулки подшипника коррелирует с демпфирующей способностью материала, добротностью и виброустойчивостью в целом.

Для увеличения вибропоглощения предложено формировать втулку навивкой на бронзовый пустотелый цилиндр ленты технического картона, а затем армирующей металлической сетки с последующим заполнением ее ячеек древесной мукой с кварцевым песком. Наружный диаметр втулки подшипника изготавливается из лигнофоля, представленного не менее чем тремя послойно расположенными в последовательности уменьшения к наружному диаметру значений модуля упругости породами древесины. В такой композиции волокнистая структура картона и древесины способствует снижению колебаний со стороны вращающегося вала вследствие диссипации энергии, передающейся в объеме композита между волокнами, а также слоями ранней (менее плотной) и поздней древесины. Причем декремент колебаний имеет максимум в слоях лигнофоля, характеризующихся меньшими значениями модуля упругости.

Под воздействием вибрации в структуре древесины распространяются волны деформации. От источника вибрационных возмущений древесина ранней и поздней зоны, а также слои, образованные сочетанием картона, древесной

муки с кварцевым песком и шпона, оказываются нагруженными механическими импульсами. Вследствие инерционности, наличия сил трения и необратимых деформаций импульсы по мере прохождения через структурные слои во втулке подшипника постепенно ослабевают. Таким образом, энергия колебательного движения источника вибрации в процессе прохождения волны затрачивается на ускорение среды и восполнение потерь при необратимых деформациях [15, 20].

Целесообразность заполнения ячеек металлической сетки древесной мукой с кварцевым песком обусловлена вибродиссипативными свойствами сыпучих сред. Диссипация происходит вследствие трения сухих поверхностей частиц древесины и песка друг о друга, необратимых деформаций недостаточно упругих фаз, наличия различных сил сопротивления перемещению частиц (сил сцепления). Диссипация энергии вибровозмущения обусловлена также асимметрией системы «частицы сыпучего материала – ограничивающие плоскости и поверхности», что обеспечивает преодоление сил трения, возникающих при относительном движении частиц сыпучей массы. Виды сопротивления при этом обобщенно сводятся к вязким и сухим сопротивлениям, а вибрация играет роль дополнительного «быстрого» движения, накладывающегося на основное «медленное» [17]. Взаимосвязь между частицами снижается, и сыпучий материал переходит в частично или полно вибровзвешенное состояние.

Потери кинетической энергии от вибрации в древесине, реализующей свои вибродемпфирующие свойства, можно условно разделить на два вида – объемные (за счет деформации сжатия–разряжения) и сдвиговые. В отличие от однородного материала, работающего только за счет потерь из-за объемной деформации (на сжатие или растяжение), скомбинированный из нескольких разнородных слоев (картона, металлической сетки с наполнителем и шпона) работает еще и за счет сдвиговой деформации между слоями. Вследствие этого в многослойном материале создаются условия для внутреннего отражения вибрационных волн.

Результаты сравнительных испытаний разработанного подшипника и прототипа приведены в таблице.

Результаты испытаний подшипника скольжения по критерию амплитуды вибрации вала

Параметры составляющих слоев втулки*		Частота нагружения, Гц	Амплитуда вибраций, $\cdot 10^{-3}$ м
Толщина слоев картона / общая толщина слоев	Толщина шпона древесины / общая толщина слоев		
0,25 / 0,75	1,0 / 3,0	2	0,10
0,50 / 1,50	1,2 / 3,6	50	0,12
1,00 / 3,00	1,5 / 4,5	100	0,17
Древесно-металлический подшипник из прессованной древесины [13]	–	–	0,55

*Структура композита: втулка длиной 50 мм и диаметром 32 мм; технический картон толщиной от 0,25 до 1,00 мм и плотностью 120...160 г/м²; эпоксидная смола ЭД-20; армирующая металлическая сетка с размерами ячеек 2,0×2,0 мм; древесная мука с кварцевым песком фракции 0,10...0,25 мм; шпон ясеня, дуба и пихты толщиной 1,0...1,5 мм с прикатыванием под давлением 0,5 МПа.

В отличие от аналогов разработанная конструкция втулки подшипника позволяет устойчиво обеспечивать виброгасящие свойства опор валов в диапазоне вибрационных возмущений от 2 до 100 Гц.

Выводы

1. Оценку несущей способности древесно-металлических подшипников скольжения с учетом анизотропии свойств предложено выполнять на основе анализа напряженно-деформационного состояния на контактных поверхностях вала, втулки, вкладыша и корпуса при решении контактной задачи методом конечных элементов.

2. Представлен алгоритм расчета различных типов подшипников и разработано программное обеспечение, позволяющее в зависимости от числа контактных поверхностей между элементами подшипника за счет увеличения количества узлов в конечно-элементной модели получить возможность детализации напряженно-деформационного состояния.

3. Разработана структура древесно-металлического материала для изготовления вкладышей и втулок подшипников из клееных композиций, в состав которых входит вибропоглощающая мелкофракционная составляющая, находящаяся в вибровзвешенном состоянии.

4. При прогнозировании работоспособности подшипников скольжения и обоснованном выборе путей повышения их срока службы необходимо оценивать взаимовлияние совокупностей, обуславливающих механические и химические формы изнашивания вследствие взаимовлияния триботехнических и эксплуатационных факторов, порождающих синергетический рост и интенсификацию протекающих процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Астапович Г.Н., Врублевский В.Б. Использование древесины в качестве подшипникового материала: тез. докл. 6-й республик. науч. конф. студентов и аспирантов «Физика конденсированных сред». Гродно: Изд-во ГрГУ, 1998. С. 8. [Astapovich G.N., Vrublevskiy V.B. The Use of Wood as a Bearing Material: *Proceedings of the 6th Republican Scientific Conference of Students and Postgraduates "Physics of Condensed Media"*. Grodno, GrSU Publ., 1998. 8 p.].

2. Белокуров В.П., Смольяков А.И. Напряженно-деформированное состояние анизотропных подшипников скольжения из прессованной древесины // Славянтрибо-4. Трибология и технология: тез. докл. междунар. симп. Санкт-Петербург, 23–27 июля 1997 г. Рыбинск: Рыбин. гос. авиац. технол. акад. им. П.А. Соловьева, 1997. С. 39–42. [Belokurov V.P., Smol'yakov A.I. Stress-Strain Behavior of Anisotropic Sliding Bearings Made of Molded Wood. *Slavantribo-4. Tribology and Technology: Proceedings of the International Symposium. Saint Petersburg, July 23–27, 1997*. Rybinsk, RGATA imeni P.A. Solov'yeva Publ., 1997, pp. 39–42].

3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с. [Gallagher R.H. *Finite Element Analysis: Fundamentals*. Trans. from English. Moscow, Mir Publ., 1984. 428 p.].

4. Геккер Ф.Р. Динамическая модель узлов трения, работающих без смазочных материалов // Трение и износ. 1993. № 6. С. 1051–1058. [Gekker F.R. Dynamic Model of Friction Units Operating without Lubricants. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 1993, no. 6, pp. 1051–1058].

5. ГОСТ ИСО 7902-1–2001. Гидродинамические радиальные подшипники скольжения, работающие в стационарном режиме. Круглоцилиндрические подшипники. Ч. 1. Метод расчета. М.: Изд-во стандартов, 2002. 28 с. [*State Standard ISO. GOST ISO 7902-1–2001. Hydrodynamic Plain Journal Bearings under Steady-State Conditions. Circular Cylindrical Bearings. Part 1. Calculation Procedure*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002. 28 p.].

6. Зернин М.В. Расчетно-экспериментальная оценка долговечности подшипников скольжения по системе критериев взаимодействия и повреждения поверхностей // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2001. № 3. С. 190–191. [Zernin M.V. Computational and Experimental Evaluation of the durability of Sliding Bearings according to the System of Criteria of Interaction and Damage of Surfaces. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids], 2001, no. 3, pp. 190–191].

7. Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Сидоров О.В., Муратов Д.И. Подшипник скольжения. Патент № 2286489 Российская Федерация, F 16 C 33/18; заявл. 14.03.2005; опубл. 27.10.2006. [Pamfilov E.A., Sheveleva E.V., Sidorov O.V., Muratov D.I. *Slider Bearing*. Patent RF no. RU 2286489 C1, 2006].

8. Пыриков П.Г., Ольшевский А.А., Данилюк А.Я. К вопросу решения контактной задачи в оценке нагруженности древесно-металлических подшипников // XII Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. тр. в 4 т. Т. 3: Механика деформируемого твердого тела. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С. 967–969. [Pyrikov P.G., Ol'shevskiy A.A., Danilyuk A.Ya. To the Solution of the Contact Problem in Assessing the Loading of Wood-Metal Bearings. *XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Proceedings in 4 Vol. Vol. 3: Mechanics of Deformable Solids*. Ufa, RIC BashSU Publ., 2019, pp. 967–969]. DOI: [10.22226/2410-3535-2019-congress-v3](https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-congress-v3)

9. Симин А.П. Повышение долговечности вкладышей подшипников скольжения, изготавливаемых из композиционных материалов на основе растительных полимеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2003. 20 с. [Simin A.P. *Increasing the Durability of Slide Bearing Inserts Made of Composite Materials Based on Plant Polymers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Bryansk, 2003. 20 p.].

10. Тихомиров В.П., Горленко О.А., Порошин В.В. Методы моделирования процессов в трибосистемах. М.: МГИУ, 2004. 292 с. [Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A., Poroshin V.V. *Methods of Modeling Processes in Tribosystems*. Moscow, MSIU Publ., 2004. 292 p.].

11. Трибология. Состояние и перспективы: сб. науч. тр. в 4 т. Т. 2. Смазка и смазочные материалы / под ред. С.М. Захарова и И.А. Буяновского. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. 504 с. [*Tribology. Status and Prospects: Collection of Academic Papers in 4 Vol. Vol. 2. Lubrication and Lubricants*. Ed. by S.M. Zakharov, I.A. Buyanovskiy. Ufa, USATU Publ., 2019. 504 p.].

12. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избр. работы (к 120-летию со дня рождения) / отв. ред. И.Г. Горячева. М.: КРАСАНД, 2012. 512 с. [Khrushchev M.M. *Friction, Wear and Microhardness of Materials: Selected Works (to the 120th Anniversary)*. Ed. by I.G. Goryachev. Moscow, KRASAND Publ., 2012. 512 p.].

13. Хухрянский П.Н. Прессование древесины. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 351 с. [Khukhryanskiy P.N. *Pressing of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 351 p.].

14. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины: моногр. М.: ФЛИНТА, 2013. 122 с. [Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Wood Modification: Monograph*. Moscow, FLINTA Publ., 2013. 122 p.].

15. Cleon L.M., Sauvage G. Rail Vehicles' Riding Quality and Comfort Related to Theoretical and Experimental Optimization. Application to High Speed Trains. *Vehicle System Dynamics*, 1985, vol. 14, iss. 1-3, pp. 107–114. DOI: [10.1080/00423118508968809](https://doi.org/10.1080/00423118508968809)

16. Evelson L.I., Pamfilov E.A., Rafalovskaia M.Y. Mathematical Modeling of Dynamically Loaded Friction Units. *Proceedings of 28th Israel Conference on Mechanical Engineering*. Beersheba, Israel, Ben-Gurion University of the Negev, 2000, pp. 15–17.
17. Fries J.R., Kennedy F.E. Bibliographical Databases in Tribology. *Journal of Tribology*, 1985, vol. 107, iss. 3, pp. 285–294. DOI: [10.1115/1.3261052](https://doi.org/10.1115/1.3261052)
18. Komanduri R., Hou Z.B. Thermal Analysis of Dry Sleeve Bearings – A Comparison between Analytical, Numerical (Finite Element) and Experimental Results. *Tribology International*, 2001, vol. 34, iss. 3, pp. 145–160. DOI: [10.1016/S0301-679X\(00\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00144-4)
19. Politakis P., Weiss S.M. Using Empirical Analysis to Refine Expert System Knowledge Bases. *Artificial Intelligence*, 1984, vol. 22, iss. 1, pp. 23–48. DOI: [10.1016/0004-3702\(84\)90024-9](https://doi.org/10.1016/0004-3702(84)90024-9)
20. Starghisky V.E., Shalobaev E.V., Sherbakov S.V. On Compiling a Terminological Reference-Dictionary on Gearing. *Proceedings of International Conference «Power Transmissions '03», September 11–12, 2003, Section I*. Sofia, BolGAN, 2003, pp. 180–186.
21. Tian X., Kennedy Jr. F.E. Maximum and Average Flash Temperatures in Sliding Contact. *Journal of Tribology*, 1994, vol. 116, iss. 1, pp. 167–174. DOI: [10.1115/1.2927035](https://doi.org/10.1115/1.2927035)

IMPROVING THE PERFORMANCE OF WOOD-METAL SLIDE BEARINGS FOR FORESTRY MACHINERY

Galina A. Pilyushina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>

Pavel G. Pyrikov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAR-1011-2020](https://orcid.org/0000-0003-2338-7458),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-7458>

Evgeny A. Pamfilov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>

Aleksey Ya. Danilyuk, Postgraduate Student

Vladimir V. Kapustin, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>

Bryansk State Technical University, b-r 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation; e-mail: rector@tu-bryansk.ru, pyrikovpg@mail.ru

Abstract. The performance of slide bearings in forestry machines and equipment is largely determined by the load-carrying capacity and antifriction qualities that depend on the bearing capacity of the sleeve (insert) material, the design rigidity and the nature of the forces during operation. As a result, the bearing materials undergo cyclic changes in the state of the sleeve material, as well as the elements that provide reinforcing, heat-conducting and anti-wear functions. The paper shows the results of research on the stress-strain behavior of anisotropic composite materials in the structures of wood-metal slide bearings. A method for ensuring vibration stability is proposed. It is based on maintaining the damping properties of the support that change in the course of wearing. The functionality of the developed program, which is used to solve the contact and thermal issues in the design of slide bearings, is described. A wood-metal material for making bearing sleeves and inserts from laminated compositions was created and studied. The compositions include a vibration-absorbing and fine-fractional component in a vibration-weighted state and a layered structure heterogeneous in thickness of the sleeve, characterized by a variable elastic modulus, that provides damping properties. The proposed design of a slide bearing using this material is focused on its use mainly in the conditions of shock-cyclic loading, which is typical for operation of most forestry machines and equipment.

For citation: Pilyushina G.A., Pyrikov P.G., Pamfilov E.A., Danilyuk A.Ya., Kapustin V.V. Improving the Performance of Wood-Metal Slide Bearings for Forestry Machinery. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 156–168. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-156-168

Funding: Project “Research and Creation of Slide Bearings of Increased Wear Resistance on the Basis of Wood-Metal Composite Materials” and the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 9.10677.2018/11.12).

Keywords: friction-sliding support, composite material, contact problem, finite element method, anisotropy, vibration absorption, contact pressure, stress, deformation, wear resistance.

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

Поступила 20.11.19 / Received on November 20, 2019



УДК 676.056.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРАХ****В.П. Сиваков, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [AAC-6084-2021](https://orcid.org/0000-0002-9387-1512),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>**А.В. Вураско, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>**Н.В. Кузубина, канд. техн. наук, доц.;** *ResearcherID:* [AAC-4846-2021](https://orcid.org/0000-0002-0438-406X),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-0438-406X>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: vurasko2010@yandex.ru, sivakov.VP@usfeu.ru, Nelly3416@mail.ru

Аннотация. Цель исследования – разработка методов определения тепловых потерь в сушильных цилиндрах. Экспериментальные исследования их температуры выполнены в сушильной части бумагоделательной машины при установившемся режиме работы. Определены средние, предельные и допустимые статистические характеристики температур сушильных цилиндров. По минимально-допустимым уровням температур выявлены сушильные цилиндры с повышенным содержанием конденсата и обоснован ремонт системы отвода конденсата для снижения тепловых потерь (расхода пара). Установлена причина неравномерной сухости бумажного полотна по ширине. Конденсатное кольцо на внутренней стенке по краям сушильных цилиндров приобретает утолщение из-за влаги, поступающей с торцевых крышек от действия центробежных сил. Конденсат выводят из сушильных цилиндров сифоном с приводной стороны. Поэтому на лицевой стороне сушильных цилиндров конденсатная пленка имеет большую толщину, чем на приводной стороне, а бумажное полотно просыхает хуже. Односторонний вывод конденсата и физический эффект центробежного сгона конденсата с торцевых крышек на боковую внутреннюю поверхность сушильных цилиндров приводят к тому, что бумажное полотно имеет меньшую сухость с лицевой стороны. Применение теплоизоляции торцевых крышек будет способствовать равномерной сухости по ширине бумажного полотна. Данные экспериментальных исследований температуры обработаны методами математической статистики для определения уровня тепловых потерь при контактной сушке бумажного полотна на сушильных цилиндрах от торцевых крышек к окружающему воздуху. Расчет тепловых потерь выполнен по уточненной методике исследования тепловых процессов при контактной сушке бумажного полотна. Установлено, что применение теплоизоляции торцевых крышек сушильных цилиндров обеспечивает снижение расхода пара на контактную сушку бумажного полотна без ущерба для технологического процесса. Результаты исследования можно применить для сокращения тепловых потерь в сушильной части бумагоделательных машин на цилиндрах, не имеющих теплоизоляции торцевых крышек. Например, для бумагоделательной машины, состоящей из 56 цилиндров диаметром 1500 мм, производительностью 7000 кг/ч абсолютно сухой бумаги, теплоизоляция их торцевых крышек экономит расход пара на сушку бумажного полотна до 223 кг/ч. Разработаны и апробированы методы обнару-

жения сушильных цилиндров с повышенным содержанием конденсата по допустимым уровням температуры и уточненный метод определения тепловых потерь при контактной сушке бумажного полотна на сушильных цилиндрах.

Для цитирования: Сиваков В.П., Вураско А.В., Куцубина Н.В. Экспериментальное и теоретическое исследование тепловых потерь в сушильных цилиндрах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 169–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179

Ключевые слова: сушильный цилиндр, температура торцевых крышек, диагностирование, теплоемкость, охлаждение, теплоизоляция, тепловые потери, экономия.

Введение

В настоящее время снижению тепловых потерь и энергосбережению в целлюлозно-бумажном производстве (ЦБП) уделяется значительное внимание. Повышение эффективности процессов теплообмена в конденсатном хозяйстве рассмотрено в [1, 2, 4]. Отмечена актуальность проблем совершенствования проектирования и эксплуатации теплообменного оборудования пароконденсатного хозяйства предприятий ЦБП.

Вопросы энергосбережения при производстве бумаги и картона рассматривают как одно из основных направлений при модернизации оборудования [10, 11] в исследованиях [12, 19] и обсуждают на семинарах [13].

Инновационные решения по совершенствованию процессов и оборудования сушки бумаги предложены в работах [7, 8, 13–17, 20, 21], где исследованы и обоснованы новые технологические и технические решения, обеспечивающие сушку бумаги при низких затратах энергии. Отмечено, что к новым технологиям производства ЦБП относят инжиниринговые решения по энергосбережению.

Цель исследования – разработка методов определения тепловых потерь в сушильных цилиндрах при контактной сушке бумажного полотна.

Объекты и методы исследования

Сушильные цилиндры (СЦ) предназначены для контактной сушки бумажного полотна, происходящей только по части боковой поверхности СЦ, охватываемой бумагой. Другая часть боковой поверхности СЦ, не контактирующая с полотном бумаги, а также поверхности торцевых крышек соприкасаются с воздухом и нерационально расходуют тепловую энергию. Тепло, отводимое от торцевых крышек, можно рассматривать как тепловые потери. При определении поверхности СЦ, соприкасающейся с воздухом, поверхность торцевых крышек не учитывают. Предполагают, что они будут защищены теплоизоляцией [3]. На отечественных предприятиях СЦ в бумагоделательных машинах не имеют теплоизоляции торцевых крышек.

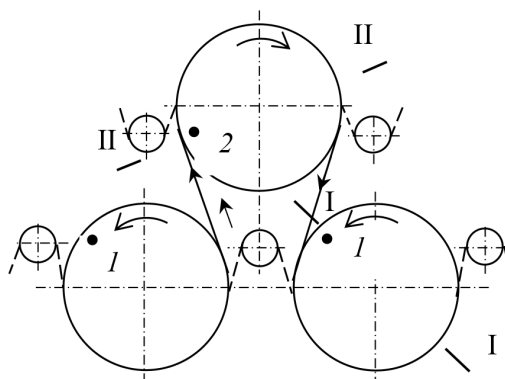
Паро-конденсатная система СЦ большинства бумагоделательных машин представлена групповой системой теплоснабжения. Дроссельные шайбы, выпускающие конденсат и пролетный пар, изготовлены с нерегулируемым условным проходом влаги. При изменении теплового и гидравлического режимов паро-конденсатной системы и скорости бумагоделательной машины дроссельные шайбы не обеспечивают пропорциональную изменившимся условиям подачу пара и удаление конденсата. Это приводит к его накоплению и снижению теплоотдачи от греющего пара к стенке СЦ.

Температуру торцевых крышек СЦ измеряли с лицевой стороны при установившейся рабочей скорости машины. При этом применяли пирометр Tem Pro300 с диапазоном съема показаний от -50 до $+380$ °С. Предварительно поверхности торцевых крышек в местах измерения температуры очищали от загрязнений. Луч пирометра при измерении направляли под прямым углом к поверхности торцевой крышки, расстояние от пирометра до которой – $0,8 \dots 1,0$ м.

Расположение точек измерения температур на поверхности торцевых крышек выбрано по контурным температурным графикам в диаметральном сечении. Установлено, что в нем точки следует размещать в интервале от 90 до 120 мм в направлении от поверхности СЦ к оси вращения. При измерениях такое расположение точек предотвращает искажение данных о температурах, в противном случае на них могли бы повлиять крепежный кольцевой борт крышки и люк в ней. Для обеспечения одинаковых условий измерения по СЦ нижнего и верхнего рядов диаметральные сечения I-I и II-II повернуты от горизонтальной оси так, чтобы точки измерения температур были расположены перед линиями контактов полотна бумаги с СЦ (рис. 1).

Рис. 1. Схема контрольных точек измерения температур торцевых крышек СЦ: 1 и 2 – точки измерения температур нижнего и верхнего рядов; I-I, II-II – расположение точек измерения температур

Fig.1. Scheme of the control points for measuring the temperature of end caps of the drying cylinders: 1, 2 – temperature measuring points of the lower and upper rows; I-I, II-II – location of temperature measurement points



Экспериментально исследована температура у торцевых крышек СЦ № 12–22 и 45–56. Измерения температуры СЦ в группе по пару выполнены при установившемся режиме работы сушильной части за период времени 58...62 мин. Каждый СЦ при последовательном обходе исследован 3 раза. Замеры температуры в каждой точке производили с выдержкой в 2 мин, рассчитывали средние значения и статистически обрабатывали полученные данные – раздельно для каждой из обследованных групп СЦ по пару. При разработке температурного метода определения СЦ с повышенным содержанием конденсата использованы работы [7, 8].

Результаты исследования и их обсуждение

Среднее арифметическое значение температур \bar{t}_k , °С, цилиндров каждой группы по пару определяли по формуле

$$\bar{t}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad i=1,2,\dots,n, \quad (1)$$

где k – номер сушильной группы по пару; n – количество СЦ в группе по пару; t_i – температура i -го СЦ.

Среднее квадратичное отклонение температуры:

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_k)^2}. \quad (2)$$

Допустимые уровни температур СЦ:

минимальные

$$T_{k \min} = \bar{t}_k - t_{ck} S_k; \quad (3)$$

максимальные

$$T_{k \max} = \bar{t}_k + t_{ck} S_k, \quad (4)$$

где t_{ck} – табличное значение критерия Стьюдента для k -й сушильной группы по пару [6].

Измеренные уровни температур СЦ, средние арифметические значения \bar{t}_k , средние квадратичные отклонения S_k и допустимые уровни температур $T_{k \min}$, $T_{k \max}$, рассчитанные по формулам (1)–(4), приведены в таблице, графики температур СЦ второй и первой групп по пару показаны на рис. 2.

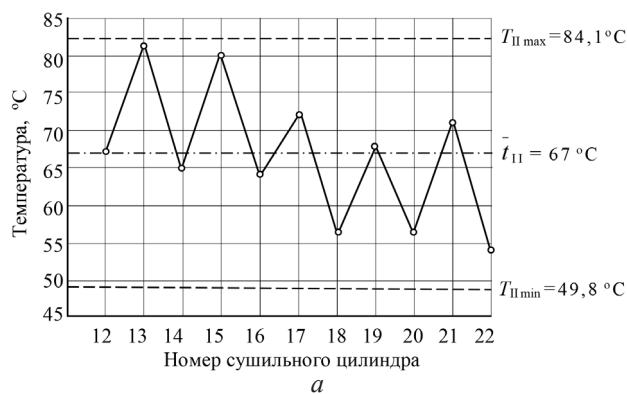


Рис. 2. Графики температур СЦ второй (а) и первой (б) сушильных групп по пару

Fig. 2. Temperature graph of the drying cylinders of the second (a) and the first (b) steam drying groups

**Температура торцевых крышек СЦ второй и первой сушильных групп
по пару с лицевой стороны в рабочем режиме**

Вторая сушильная группа		Первая сушильная группа	
Номер цилиндра	Температура t_{II} , °C	Номер цилиндра	Температура t_I , °C
12	67	45	100
13	83	46	97
14	65	47	101
15	80	48	98
16	64	49	102
17	73	50	91
18	56	51	72
19	68	52	94
20	56	53	97
21	71	54	95
22	54	55	100
		56	71
$\bar{t}_{II} = 67^\circ\text{C}$		$\bar{t}_I = 93^\circ\text{C}$	
$S_{II} = 9,4^\circ\text{C}$		$S_I = 10,6^\circ\text{C}$	
$T_{II\min} = 49,8^\circ\text{C}; T_{II\max} = 84,1^\circ\text{C}$		$T_{I\min} = 74,2^\circ\text{C}; T_{I\max} = 112,1^\circ\text{C}$	

Из рис. 2, а следует, что значения температур поверхности СЦ второй группы не выходят за границы допустимых уровней с преобладанием смещения температур к $T_{II\min}$.

Для цилиндров первой группы по пару (рис. 2, б) характерен более высокий уровень экспериментальных и расчетных характеристик температуры по сравнению со второй группой. Температура поверхности торцевых крышек СЦ № 51 и 56 ниже допустимого уровня $T_{I\min} = 74,2^\circ\text{C}$. Поэтому следует проверить исправность паро-конденсатной системы этих цилиндров при плановом останове бумагоделательной машины.

По минимально-допустимым уровням температур выявлены СЦ с повышенным содержанием конденсата и обоснован ремонт системы отвода этих испарений для снижения тепловых потерь (расхода пара).

В СЦ скоростных бумагоделательных машин конденсат, образующийся при охлаждении пара на внутренней поверхности, подвержен воздействию сил тяжести G и центробежных сил F_{II} [3, 5]. Движение конденсата на внутренней поверхности СЦ под действием этих сил принципиально отличается от его движения по внутренней поверхности торцевых крышек.

От действия сил G и F_{II} на внутренних стенках СЦ происходит образование конденсатных колец, значительно снижающих теплопередачу от греющего пара к стенке СЦ и эффективность контактной сушки бумажного полотна [3, 5].

Частицы конденсата и в целом конденсатная пленка, образующаяся при конденсации пара на внутренней поверхности торцевых крышек, имеют движение от оси вращения к периметру, ограниченному внутренним радиусом СЦ.

Другими словами, конденсат под действием центробежных сил движется с торцевых крышек в радиальном направлении от оси к боковой поверхности СЦ, увеличивая толщину конденсатного кольца и уменьшая толщину конденсатной пленки на внутренней поверхности торцевых крышек.

На внутренней поверхности торцевых крышек из-за хорошего отвода влаги происходит более интенсивная конденсация греющего пара и увеличение температуры поверхности по сравнению с боковой поверхностью СЦ. Тепловой поток от торцевых крышек направлен перпендикулярно от зоны контактной сушки бумаги на станины, стенки теплоизоляционного колпака и в зал, место расположения бумагоделательной машины, т. е. происходит отвод тепла из зоны сушки бумаги.

Установлена одна из причин неравномерной сухости бумажного полотна по ширине. Конденсатное кольцо на внутренней стенке по краям СЦ приобретает утолщение из-за конденсата с торцевых крышек, поступающего от действия центробежных сил. Его выводят из СЦ сифоном с приводной стороны, поэтому на этой стороне конденсатная пленка имеет меньшую толщину, чем с лицевой, на которой при большой толщине конденсатного кольца происходит значительное снижение теплоотдачи от СЦ к бумаге по сравнению с приводной стороной. Это уменьшает температуру на внешней стороне. Бумажное полотно на лицевой стороне СЦ просыхает хуже. Односторонний вывод конденсата и физический эффект центробежного сгона конденсата с торцевых крышек на внутреннюю поверхность СЦ приводят к тому, что бумажное полотно имеет меньшую сухость с лицевой стороны бумаги. У многих бумагоделательных машин для выравнивания сухости полотна по ширине используют устройства дополнительной сушки с лицевой стороны. Применение теплоизоляции торцевых крышек будет способствовать равномерной сухости по ширине бумажного полотна.

Рассчитаем экономию греющего пара, расходуемого на сушку полотна бумаги, при установке теплоизоляции торцевых крышек для СЦ диаметром $D = 1,5$ м, длиной $L = 6,8$ м, толщиной стенок цилиндра и торцевой крышки $\delta = 0,03$ м (производительность машины 7000 кг/ч абсолютно сухой бумаги).

Площадь боковой поверхности СЦ:

$$F_6 = \pi DL = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 6,8 = 32 \text{ м}^2.$$

Площадь боковой поверхности СЦ, соприкасающейся с воздухом:

$$F_{6.в} = \frac{1-\beta}{\beta} F_6 = \frac{1-0,65}{0,65} \cdot 32 = 17,2 \text{ м}^2,$$

где β – средний коэффициент использования боковой поверхности СЦ.

Площадь поверхности торцевых крышек СЦ, соприкасающейся с воздухом:

$$F_k = z \frac{\pi D^2}{4} = 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} = 3,53 \text{ м}^2,$$

где z – количество торцевых крышек.

Площадь общей поверхности СЦ, соприкасающейся с воздухом:

$$F_{ц.о} = F_{6.в} + F_k = 17,20 + 3,53 = 20,73 \text{ м}^2.$$

Коэффициент теплопередачи поверхности торцевых крышек можно снизить за счет их теплоизоляции. Например, при теплоизоляции минеральной ватой коэффициент теплопередачи k уменьшается в 4 раза [9]. Снижение

тепловых потерь при теплоизоляции торцевых крышек СЦ пропорционально сокращению поверхности контакта с воздухом нетеплоизолированных торцевых крышек.

Площадь пропорциональной поверхности теплопередачи торцевых крышек после теплоизоляции:

$$F_{к.т} = z \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{k} = 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} \cdot \frac{1}{4} = 0,88 \text{ м}^2,$$

где k – коэффициент теплопередачи.

Площадь поверхности теплопередачи СЦ, соприкасающейся с воздухом, после теплоизоляции торцевых крышек:

$$F_T = F_{6,в} + F_{к.т} = 17,20 + 0,88 = 18,08 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности теплопередачи от СЦ в воздух после установки теплоизоляции торцевых крышек эквивалентно сокращается на

$$\Delta F_{ц.о} = \frac{F_{ц.о} - F_T}{F_{ц.о}} \cdot 100 = \frac{20,73 - 18,08}{20,73} \cdot 100 = 12,78 \text{ \%}.$$

Влагосодержание воздуха на входе в сушильную часть:

$$X_1 = \chi \frac{\varphi_1 P_{н1}/10^5}{1 - \varphi_1 P_{н1}/10^5} = 0,622 \cdot \frac{0,4 \cdot 1250/10^5}{1 - 0,4 \cdot 1250/10^5} = 0,003 \text{ кг/кг},$$

где χ – отношение газовых постоянных воздуха R_L и пара R при $R_L = 287$, $R = 462$ [3], $\chi = R_L/R = 287/462 = 0,622$; $P_{н1}$ – давление насыщенного пара при начальной влажности воздуха $\varphi_1 = 0,4$ [3], Па.

Влагосодержание воздуха на выходе из сушильной части:

$$X_2 = \chi \frac{\varphi_2 P_{н2}/10^5}{1 - \varphi_2 P_{н2}/10^5} = 0,622 \cdot \frac{0,84 \cdot 2500/10^5}{1 - 0,84 \cdot 2500/10^5} = 0,165 \text{ кг/кг},$$

где $P_{н2}$ – давление насыщенного пара при конечной влажности воздуха $\varphi_2 = 0,84$ [3], Па.

Количество влаги, вносимой с бумагой в сушильную часть:

$$W_1 = \frac{\omega_1}{100 - \omega_1} \Pi = \frac{70}{100 - 70} \cdot 7000 = 16\,330 \text{ кг/ч},$$

где ω_1 – начальная влажность бумаги на входе в сушильную часть, %; Π – производительность бумагоделательной машины, кг/ч.

Количество влаги, остающейся в бумаге:

$$W_2 = \frac{\omega_2}{100 - \omega_2} \Pi = \frac{7}{100 - 7} \cdot 7000 = 526,9 \text{ кг/ч},$$

где ω_2 – конечная влажность бумаги на выходе из сушильной части, %;

Количество подаваемого в сушильную часть воздуха:

$$L = \frac{W_1 - W_2}{X_2 - X_1} = \frac{16\,330 - 527}{0,165 - 0,003} = 97\,550 \text{ кг/ч}.$$

Коэффициент теплопередачи через поверхность СЦ, соприкасающуюся с воздухом:

$$k_b = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/6250 + 0,03/165 + 1/40} = 39,46 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}},$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи греющего пара к стенке цилиндра, кДж/м²·ч·град; δ – толщина стенки СЦ, м; λ – теплопроводность металла стенок

СЦ и торцевой крышки, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки СЦ к воздуху, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Теплоемкость воздуха:

$$C = C_1 + C_2 X_1 = 1 + 1,92 \cdot 0,003 = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}},$$

где C_1 – теплоемкость воздуха [3], $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град}$; C_2 – теплоемкость водяного пара [3], $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град}$.

Температура воздуха, подаваемого в сушильную часть:

$$t_1 = \frac{CLt_2 - k_B n F_{\text{ц.о}} \left(t_{\text{п}} - \frac{t_2}{2} \right) \eta}{CL - k_B n F_{\text{ц.о}} \frac{\eta}{2}} = \frac{1,01 \cdot 67 \cdot 247 \cdot 60 - 39,46 \cdot 56 \cdot 20,73 \cdot \left(133 - \frac{60}{2} \right) \cdot 0,7}{1,01 \cdot 67 \cdot 247 - 39,46 \cdot 56 \cdot 20,73 \cdot \frac{0,7}{2}} \approx 32 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где t_2 – конечная температура воздуха для сушки [3], $^\circ\text{C}$; $t_{\text{п}}$ – температура греющего пара [3], $^\circ\text{C}$; η – коэффициент использования тепла, отданного воздуху [3].

Определим тепловые потери СЦ через торцевые крышки.

Количество теплоты, передаваемое воздуху через торцевые крышки СЦ всей сушильной части без теплоизоляции:

$$Q_1 = n k_B F_{\text{к}} \left(t_{\text{п}} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) = 56 \cdot 39,46 \cdot 3,53 \cdot \left(130 - \frac{32 + 60}{2} \right) = 652 \, 113 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, передаваемое воздуху через торцевые крышки СЦ всей сушильной части с теплоизоляцией:

$$Q_{1\text{T}} = n k_B F_{\text{к.т}} \left(t_{\text{п}} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) = 56 \cdot 39,46 \cdot 0,88 \cdot \left(130 - \frac{32 + 60}{2} \right) = 162 \, 567 \text{ кДж/ч.}$$

Часовая экономия тепла в сушильной части, передаваемого через торцевые крышки СЦ воздуху:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_{1\text{T}} = 652 \, 113 - 162 \, 567 = 489 \, 545 \text{ кДж/ч.}$$

Часовая экономия греющего пара в сушильной части при теплоизоляции торцевых крышек СЦ:

$$D = \frac{\Delta Q}{I - C_w t_{\text{к}}} = \frac{489 \, 545}{2750 - 4,17 \cdot 133} = 223 \text{ кг/ч,}$$

где I – теплосодержание греющего пара при температуре конденсата $t_{\text{к}}$, $\text{кДж}/\text{кг}$; C_w – теплоемкость испаряемой воды [3], $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град}$; $t_{\text{к}}$ – температура конденсата [3], $^\circ\text{C}$.

Отметим, что тепловой поток от торцевых крышек СЦ направлен в основном на станины сушильной части и в зал, где расположена бумагоделательная машина. Теплоизоляция торцевых крышек СЦ, наряду с экономией пара, способствует созданию более комфортных температурных условий для обслуживающего персонала.

Выводы

1. В ходе экспериментального исследования температуры сушильных цилиндров выявлены два из них с повышенным содержанием конденсата. Метод статистической обработки температур сушильного цилиндра обеспечивает достоверную вероятность в 90 % обнаружения сушильного цилиндра с повы-

шенным содержанием конденсата. Метод можно применять при диагностировании работоспособного технического состояния систем удаления конденсата из сушильных цилиндров.

2. Метод определения тепловых потерь через торцевые крышки сушильных цилиндров апробирован при исследовании тепловых процессов бумагоделательной машины производительностью 7000 кг/ч по абсолютно сухой бумаге. Показано, что теплоизоляция торцевых крышек сушильных цилиндров значительно снижает расход пара (до 223 кг/ч) при контактной сушке бумаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бельский А.П. Проектирование и расчет теплообменных (сушильных) установок. Л.: ЛТА, 1992. 115 с. [Bel'skiy A.P. *Design and Calculation of Heat Exchange (Drying) Plants*. Leningrad, LTA Publ., 1992. 115 p.]

2. Бельский А.П., Лотвинов М.Д. Вентиляция бумагоделательных машин. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 215 с. [Bel'skiy A.P., Lotvinov M.D. *Ventilation of Paper Machines*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 215 p.]

3. Бушмелев В.А., Вольман Н.С. Процессы и аппараты целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 352 с. [Bushmelev V.A., Vol'man N.S. *Processes and Apparatus for Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 352 p.]

4. Ершов Ю.Г., Санников В.А. Конденсатное хозяйство целлюлозно-бумажных предприятий. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 263 с. [Ershov Yu.G., Sannikov V.A. *Condensate Economy of Pulp and Paper Mills*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 263 p.]

5. Куров В.С., Кокушин Н.Н. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Бумаго- и картоноделательные машины. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 588 с. [Kurov V.S., Kokushin N.N. *Theory and Design of Machinery and Equipment of the Industry. Paper and Board Machines*. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2006. 588 p.]

6. Сиваков В.П., Вураско А.В., Леонович А.А. Основы научных исследований в химической и химико-механической переработке растительного сырья. Екатеринбург: УГЛТУ, 2010. 137 с. [Sivakov V.P., Vurasko A.V., Leonovich A.A. *Fundamentals of Scientific Research in Chemical and Chemical-Mechanical Processing of Plant Raw Materials*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2010. 137 p.]

7. Сиваков В.П., Степанова Е.Н., Вураско А.А., Стоянов О.В. Кластерное диагностирование при комплексной оценке работоспособного состояния технического оборудования // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 1. С. 357–358. [Sivakov V.P., Stepanova E.N., Vurasko A.A., Stoyanov O.V. Cluster Diagnosis in a Comprehensive Assessment of the Serviceability of Technical Equipment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 1, pp. 357–358].

8. Сиваков В.П., Микушина В.Н., Вураско А.В., Стоянов О.В., Гребенищikov Ю.М. Применение трендового анализа при диагностировании технического состояния оборудования // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 2. С. 390–392. [Sivakov V.P., Mikushina V.N., Vurasko A.V., Stoyanov O.V., Grebenshikov Y.M. Application of Trend Analysis for Diagnosing the Technical State of Equipment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 2, pp. 390–392].

9. Тордуа Г.А. Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 440 с. [Tordua G.A. *Machines and Apparatus for Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 440 p.]

10. APPM to Revamp Pulp at Novodvinsk Mill. *PPI Europe*, 2014, vol. 29, no. 12, p. 11.

11. Dumas: Customized Steam and Condensate System for Palm Wörth PM 6. *Prof. Papermark*, 2004, no. 1, pp. 67–68.
12. Hazi A., Hazi G. Exergy Flows in the Paper Machine. *Modelling and Optimization in the Machines Building Field*, 2005, no. 11, vol. III, pp. 146–149.
13. *International Conference Voith Paper – Graphic Papers, September 4–6, 2002*. Salzburg, 2002, pp. 23–24.
14. Jewitt D.E. *Apparatus and Associated Method for Drying a Wet Web of Paper*. Patent US, no. 6425981, 2002.
15. Mayer R., Begemann U. *Anordnung zur Herstellung oder/und Behandlung von Bahn- oder Blattmaterial* [Device for the Production and/or Treatment of Strip or Sheet Material]. Patent DE, no. WO 2005/045130 A2, 2005.
16. Metso Paper: Inbetriebnahme der weltgrößten Wellpappenrohpapermaschine. *Allgemeine Papier-Rundschau*, 2003, pp. 16–21.
17. Sautter G.M. The Drying and Fining Processes Future Innovation Solutions for Efficiency, Quality and Safety. *Pulp and Paper Industry*, 2017, vol. 2/3, pp. 30–35.
18. Sekiya K. *Pollution Prevention Method for Cylindrical Dryer Used in Paper Machine*. Patent US, no. US 6,858,113 B1, 2005.
19. Steam System and Dryer Services. *Pulp and Paper Industry*, 2010, vol. 52, no. 8, p. 11.
20. Viljanmaa M. *Method and Equipment for Producing Driving Power in Paper or Board Mill*. Patent US, no. US 2005/0160618 A1, 2005.
21. Wolf R., Mack T., Oechsle M., Mayer W. *Verfahren und Anordnung zum Trocknen einer Faserstoffbahn insbesondere Papier-, Karton- oder Tissuerbahn*. Patent DE no. DE 19958875 A1, 2001.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF HEAT LOSSES IN DRYING CYLINDERS

Valeriy P. Sivakov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-6084-2021](https://orcid.org/0000-0002-9387-1512),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>

Alesya V. Vurasko, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

Nelli V. Kutsubina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-4846-2021](https://orcid.org/0000-0002-0438-406X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0438-406X>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: vurasko2010@yandex.ru, sivakov.VP@usfeu.ru, Nelly3416@mail.ru

Abstract. The research purpose is to develop methods for determination of heat losses in drying cylinders. Experimental study of temperature of drying cylinders performed in the drying section of a paper machine during its steady-state operation. Medium, maximum and permissible statistical characteristics of drying cylinder temperatures were defined. The drying cylinders with increased condensation concentration were determined by the minimally permissible temperature levels and the repair of the condensation drainage system to reduce heat losses (steam consumption) was justified. The cause of uneven dryness of the paper web across the width has been determined. The condensate ring on the inner wall at the edges of the drying cylinders gets thickened due to moisture coming from the end caps from the action of centrifugal forces. The condensation is removed from the drying cylinders with a siphon on the drive side. Therefore, on the front side of the drying cylinders condensate film has a greater thickness, and the paper web dries worse. The single-sided condensate disposal and the physical effect of centrifugal condensate runoff from the end caps to the side inner surface

of the drying cylinders cause a lower dryness from the front side of the paper web. The use of thermal insulation of end caps will contribute to uniform dryness across the width of the paper web. The results of experimental studies were processed by methods of mathematical statistics in order to describe the thermal losses during contact drying of the paper web on drying cylinders with and without thermal insulation of the end caps to the ambient air. The calculation of heat losses is carried out according to the refined method of researching thermal processes in contact drying of paper web. It is found, that the use of thermal insulation of the end caps of the drying cylinders provides a reduction in steam consumption for contact drying of the paper web without affecting the technological process. The research results can be used to reduce heat losses in the drying section of paper machines on cylinders that do not have thermal insulation of the end caps. For instance, for a paper machine consisting of 56 cylinders with a diameter of 1500 mm and a capacity of 7000 kg/h of absolutely dry paper, insulating their end caps saves up to 223 kg/h of steam for drying the paper web. Methods of detection of drying cylinders with increased content of condensation on permissible levels of temperature is developed and approved. A refined method for determining thermal losses during contact drying of the paper web on drying cylinders has been developed.

For citation: Sivakov V.P., Vurasko A.V., Kutsubina N.V. Experimental and Theoretical Study of Heat Losses in Drying Cylinders. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 169–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179

Keywords: drying cylinder, temperature of end cups, diagnosis, heat capacity, cooling, thermal insulation, heat losses, saving.

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

Поступила 12.02.20 / Received on February 12, 2020

УДК 66.021.3.001.57:532.529

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-180-193

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ ФОРСУНОК В СТРУЙНЫХ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЯХ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.В. Анискин, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

В.С. Куров, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; e-mail: asv-47@mail.ru, vskurov18@mail.ru

Аннотация. Показано, что современное развитие технологии производства целлюлозы связано с совершенствованием оборудования систем «газ–жидкость», обеспечивающего основные технологические процессы варки целлюлозы и регенерации химических реактивов. Кроме того, это оборудование, предназначенное для рекуперации химических реактивов и снижения их выбросов в окружающую среду, является частью технологического процесса. Применение скрубберов в производстве целлюлозы имеет преимущества относительно других направлений, поскольку при этом используется замкнутый цикл регенерации варочного раствора. Исследования процессов, протекающих в скрубберах разного типа, становятся более многочисленными и фундаментальными. Одним из широко применяемых скрубберов с орошением газа струями капель является струйный газопромыватель, обладающий рядом положительных свойств: не создает сопротивления газовому потоку в газоходе, имеет тягодутьевые свойства вследствие эжекции. Только эти аппараты обеспечивают необходимые условия для устойчивости газового потока и струйного эффекта, позволяющего значительно повысить качество очистки выбросов. Для применения струйного эффекта и интенсификации работы технологического оборудования требуется описание процессов переноса вещества в струйных газопромывателях с учетом полидисперсной структуры капельного потока и особенностей дробления жидкости на капли центробежно-струйными форсунками. Научные работы, посвященные проблеме реализации струйного эффекта, показали необходимость исследования динамики дробления жидкости в центробежно-струйных форсунках, создающих заполненную каплями струю с большим углом раскрытия. Цель исследования – изучение скорости начального движения капель в области, расположенной непосредственно после участка дробления сплошной струи жидкости, вытекающей из форсунки. Для эксперимента применена фотографическая методика с двумя искровыми лампами. Одновременно контролировалось распределение плотности орошения. Результаты измерения распределений абсолютной скорости капель и плотности орошения сравнивались между собой и определялась функция распределения скорости жидкости в поперечном сечении газо-жидкостной струи струйного газопромывателя. На основе полученных данных разработана теоретическая модель, позволяющая установить начальную скорость движения капель центробежно-струйных форсунок – показатель необходимый для разработки новых струйных газопромывателей. Результаты могут быть применены для совершенствования технологических процессов производства целлюлозы.

Для цитирования: Анискин С.В., Куров В.С. Динамические характеристики скорости истечения жидкости из форсунок в струйных газопромывателях целлюлозного производства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 180–193. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-180-193

Ключевые слова: производство целлюлозы, газожидкостное оборудование, струйный газопромыватель, струя, капли.

Введение

Целлюлозное производство основано на сложных химико-технологических процессах, для реализации которых применяют разнообразное оборудование [18]. Множество технологических процессов протекает с переносом вещества из газовой среды в жидкую среду и обратно [14]: десорбции и абсорбции, испарения и конденсации, пиролиза черного щелока и поглощения газовых выбросов в скрубберах. К газожидкостному оборудованию относятся варочные и содорегенерационные котлы, выпарные станции, растворители плава и др. Технологические процессы в реакторах газ–жидкость сопровождаются значительными выбросами в атмосферу [8, 10, 17]. Для их снижения установлены нормативные ограничения [11, 21, 29], разрабатываются оборудование и технологии его применения [22, 36, 37, 45]. Совершенствование производства целлюлозы – актуальная задача, которая неразрывно связана с развитием газожидкостного оборудования [2, 5]. Наиболее перспективны, особенно для крупных источников, исследования очистки газовых выбросов в полых скрубберах с капельным орошением в виде струй [6, 19, 34, 39].

Одним из широко применяемых скрубберов с орошением газа струями капель является струйный газопромыватель (СГП) – Jet scrubber. Это точный аппарат с капельным орошением из форсунок, который может иметь как цилиндрическую форму, так и форму трубы Вентури [20, 27, 33, 42]. В этом устройстве капли двигаются по направлению газового потока со скоростью превышающей скорость газа [23, 28, 32].

СГП обладают рядом преимуществ по сравнению с другими технологическими аппаратами газ–жидкость. К их числу относится простая конструкция полого скруббера и возможность использования эжекции газа, которая создает тягодутьевую напор. Кроме того, в СГП при определенных условиях может возникать так называемый струйный эффект [1], повышающий качество очистки газа. Причина возникновения этого эффекта заключается в том, что изменение концентрации сорбируемого газа в СГП происходит не только в результате абсорбции каплями [16], но и в ходе диффузионного переноса сорбируемого газа в поперечном направлении. Эффект возникает потому, что диффузионный перенос в СГП может быть направлен в сторону области с более высокой плотностью орошения, где интенсивность абсорбции выше.

Традиционно СГП имеет форму трубы значительного размера. На рис.1 изображен СГП корпорации GEA [38], предназначенный для очистки газов от вредных примесей, производительностью – до 30 000 м³/ч. Диаметр скруббера (DN) может достигать 1 м, а высота (b) – 8,65 м. Форсунки для орошения установлены на верхней крышке колонны.

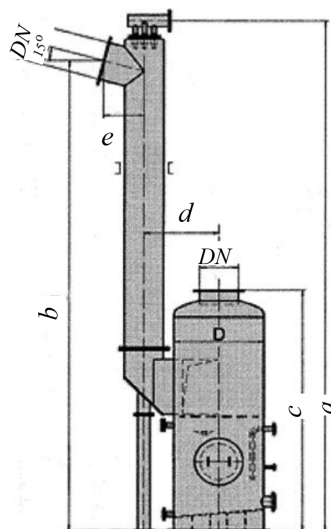


Рис. 1. Схема стандартного аппарата корпорации GEA: *a* – высота; *b* – высота входного патрубка; *c* – высота каплеуловителя; *d* – расстояние между осями скруббера и каплеуловителя; *DN* – диаметр корпуса скруббера

Fig. 1. GEA standard unit diagram: *a* – height; *b* – height of the inlet pipe; *c* – height of the droplet separator; *d* – distance between the scrubber and droplet separator axes; *DN* – diameter of the scrubber body

В целях уменьшения размеров СГП и увеличения их эффективности разрабатываются комбинированные аппараты со струйным орошением. Новый более компактный аппарат [13] с использованием струйного фильтра представлен на рис. 2.

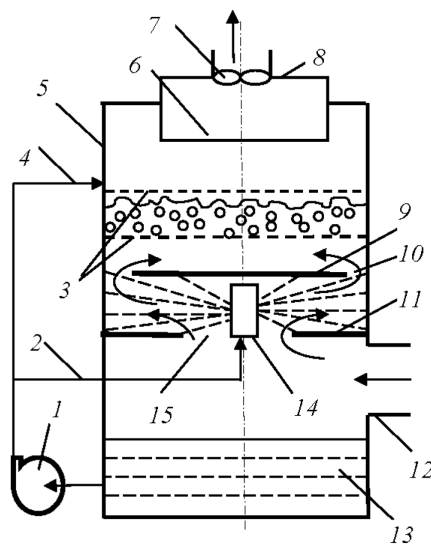


Рис. 2. Схема газоочистного аппарата со струйным фильтром: 1 – насос; 2 – линия подачи раствора на форсунки; 3 – пенный слой; 4 – линия подачи раствора в пенный слой; 5 – корпус; 6 – каплеуловитель; 7 – вентилятор; 8 – выходная труба; 9 – крышка; 10 – щелевой зазор; 11 – диафрагма; 12 – входная труба; 13 – емкость с раствором; 14 – форсунки; 15 – струйный фильтр

Fig. 2. Diagram of a gas purifying device with a jet filter: 1 – pump; 2 – line for supplying solution to the nozzles; 3 – foam layer; 4 – line for supplying solution to the foam layer; 5 – body frame; 6 – droplet separator; 7 – fan; 8 – outlet pipe; 9 – cover; 10 – slotted gap; 11 – diaphragm; 12 – inlet pipe; 13 – container with solution; 14 – nozzles; 15 – jet filter

Струйный фильтр, являющийся модификацией СГП, расположен между крышкой и диафрагмой. Капельное орошение осуществляется радиально направленными струями из центробежно-струйных форсунок, установленных на оси аппарата.

В данной конструкции струйный фильтр, используемый в сочетании с пенным слоем, позволяет повысить эффективность аппарата – струйно-пенного массообменного фильтра. По данным НПО ИМХОТЕП, такой аппарат был приобретен Сегежским ЦБК и множеством других предприятий.

Объекты и методы исследования

Для создания новых, более эффективных, обладающих струйным эффектом, компактных аппаратов необходимо проведение детальных исследований процессов, протекающих в СГП: дробления жидкости на капли из цельнофакельных форсунок [12, 24, 25, 35], движения полидисперсного капельного потока [40, 43, 44] и струйного эффекта [1].

В работе по исследованию десорбции сероводорода [4] подробно изучено дробление струи жидкости на капли с помощью центробежно-струйной форсунки, создающей сплошную капельную струю в форме конуса. Установлено, что дробление потока на капли происходит в два этапа с появлением фрагментарного участка в виде пены и занимает определенное время до образования полидисперсного капельного потока. Показано, что распределение капель по размеру имеет ограничение сверху [46].

В [15] отмечено, что движение мелких капель существенно отличается от движения крупных. Первые смещаются относительно траекторий движения вторых в сторону оси капельной струи. Существует вероятность их столкновений, что может, изменяя распределение плотности орошения, приводить к коалесценции капель.

В работе [3] представлена модель коалесценции капель в струе центробежно-струйной форсунки, которая позволяет рассчитывать изменение распределения плотности орошения.

Исследование образования и движения струй жидкости в СГП показало, что перемещение полидисперсного потока капель в значительной степени зависит от условий дробления струи при истечении жидкости из сопла форсунки и от начальной скорости капель.

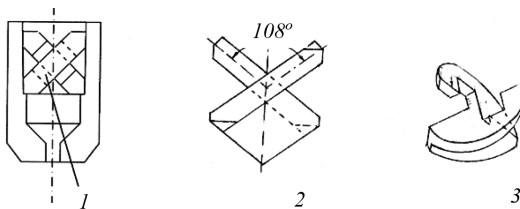
Существующий способ определения скорости истечения образующихся капель [4] не учитывает влияние области дробления струи, где осуществляется постепенный переход от сплошной струи жидкости к капельной. Это может приводить к существенным ошибкам при создании необходимых условий для использования струйного эффекта в полидисперсных потоках СГП систем газ-жидкость.

Основная цель исследования – изучение скорости истечения струи центробежно-струйной форсунки в СГП целлюлозного производства.

Схема центробежно-струйной форсунки [7] приведена на рис. 3.

Рис. 3. Крестообразные вкладыши: 1 – фирма «Варкаус»; 2 – патент Валина; 3 – патент Боуэна

Fig. 3. Cross-shaped inserts: 1 – Varkaus firm; 2 – Valin's patent; 3 – Bowen's patent



Основным элементом, образующим струю форсунки, является вкладыш (1–3), имеющий разную технологию изготовления. Он предназначен для формирования тангенциальной скорости вращения потока жидкости перед сопловым отверстием. Вращение потока жидкости позволяет увеличить угол

раскрытия выходящей струи, влияет на распределение плотности орошения и коэффициент расхода [33]. Расчеты этих характеристик являются сложной и недостаточно проработанной задачей.

В данной работе исследование скорости истечения струи центробежно-струйной форсунки проведено эмпирически путем измерения распределения абсолютной скорости движения капель фотографическим методом [9, 26, 31, 41] на близком расстоянии от области дробления струи. Дополнительно, в этом же месте, определено распределение плотности орошения.

На рис. 4 изображена схема стенда для измерения скорости капель. Фотографировали движущиеся капли воды в струе центробежно-струйной форсунки с сопловым отверстием 3 мм, углом раскрытия 48°, под давлением 0,2; 0,6; 1,0 МПа, на расстоянии 10 см от сопла форсунки, со средним объемным содержанием жидкости 0,001. Струя имела форму осесимметричного конуса с круглым поперечным сечением. С помощью фотоаппарата и двух ламп делали двойные фотографии на одном кадре с выдержкой 1 мкс и задержкой 20...40 мкс под контролем осциллографа и частотомера и точностью 0,5 %. Смещение капель увеличивало ошибку измерения до 5,5 %.

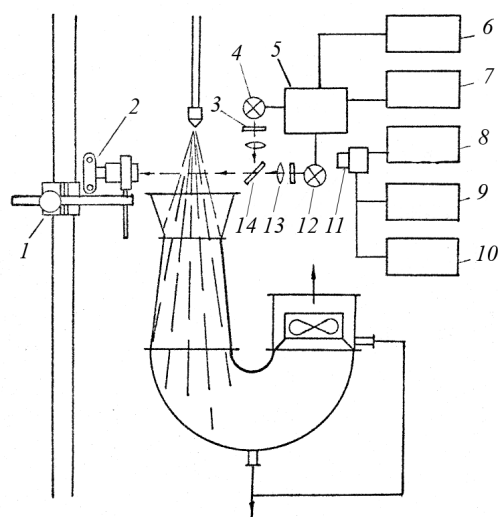


Рис. 4. Схема стенда для измерения скорости капель: 1 – координатник; 2 – фотоаппарат; 3 и 13 – красный и синий светофильтры; 4 и 12 – искровые лампы; 5 – система запуска; 6–8 – блоки питания; 9 – частотомер; 10 – запоминающий осциллограф; 11 – фотоэлектронный умножитель; 14 – полупрозрачное зеркало

Fig. 4. Diagram of the trial facility for measuring the speed of drops: 1 – transverse gear; 2 – camera; 3 and 13 – red and blue filters; 4 and 12 – spark lamps; 5 – starting system; 6–8 – power supplies; 9 – frequency meter; 10 – memory oscilloscope; 11 – photomultiplier; 14 – translucent mirror

Плотность орошения характеризует распределение расхода жидкости по сечению струи, состоящей из капель после участка дробления [30]:

$$I = \frac{\partial Q_{\text{ж}}}{\partial s}, \quad (1)$$

где I – плотность орошения, м/с; $Q_{\text{ж}}$ – объемный расход жидкости, м³/с; s – площадь орошения, м².

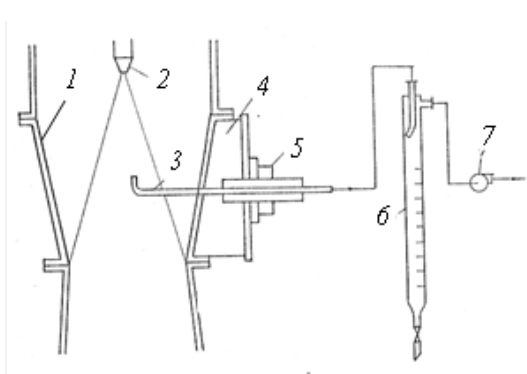
Относительная плотность орошения i – величина безразмерная, определяется как отношение плотности орошения I в точке площади поперечного сечения струи к среднему значению плотности орошения \bar{I} в этом же сечении:

$$i = I / \bar{I}. \quad (2)$$

На рис. 5 изображен стенд для измерения плотности орошения с помощью специальной трубки с калиброванным входным отверстием диаметром 3 мм. Уловленные капли вместе с воздухом попадали в сепаратор, где определяли их объем, отмечали время заполнения сепаратора.

Рис. 5. Стенд для измерения распределения плотности орошения: 1 – корпус СГП; 2 – форсунка; 3 – трубка для отбора проб; 4 – щель для трубки; 5 – координатник; 6 – сепаратор; 7 – насос

Fig. 5 Stand for measuring the irrigation density distribution: 1 – jet scrubber body; 2 – nozzle; 3 – sampling tube; 4 – tube slot; 5 – transverse gear; 6 – separator; 7 – pump



Плотность орошения вычисляли по следующей формуле:

$$I = \frac{4V_b}{t\pi D_i^2}, \quad (3)$$

где V_b – объем воды в сепараторе; t – время отбора пробы; D_i – диаметр сопла форсунки.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 6 представлены результаты измерения абсолютной скорости движения капель в поперечном сечении струи жидкости, распыленной центробежно-струйной форсункой. Они обозначены кружками.

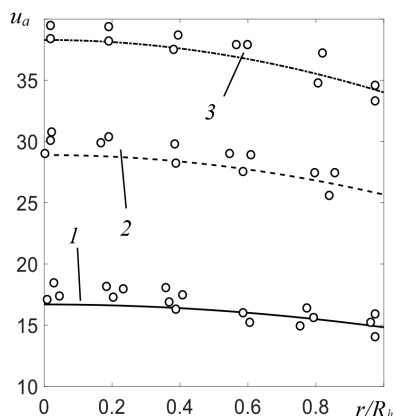
Для построения графика использовали цилиндрические координаты, такие же, как и при проведении измерений. Из распределения результатов измерений следует, что максимум абсолютной скорости при всех значениях давления совпадает с осью струи. Интерполяция результатов измерений представлена на рис. 6 в виде сплошных линий. Для интерполяции использовали простую тригонометрическую функцию следующего вида:

$$u_a = u_{am} \cos\left(\arctg\left(\frac{r}{h}\right)\right), \quad (4)$$

где u_{am} – максимальное значение абсолютной скорости жидкости; r – цилиндрическая координата радиуса струи; h – расстояние от сопла до уровня измерения.

Рис. 6. Распределение абсолютной скорости капель u_a по относительному радиусу сечения струи r/R_h (R_h – максимальный радиус нормального сечения струи на расстоянии h от сопла) при давлении жидкости $P_{ж}$, МПа: 1 – 0,2; 2 – 0,6; 3 – 1,0

Fig. 6. Distribution of the absolute speed of drops u_a over the relative radius of the jet section r/R_h (R_h – maximum value of the normal jet section radius at distance h from the snout) at a liquid pressure $P_{ж}$, МПа: 1 – 0.2; 2 – 0.6; 3 – 1.0



Функцию (4) можно записать в более простом виде через угол отклонения точки измерения от оси φ :

$$\varphi = \arctg\left(\frac{r}{h}\right). \quad (5)$$

На рис. 7 для удобства сравнения изображены результаты измерения плотности орошения в тех же координатах, что и функции распределения скоростей на рис. 6. Видно, что распределение плотности орошения существенно отличается от распределения скорости, представленного на рис. 6. Максимум не совпадает с осью струи, находится на некотором расстоянии.

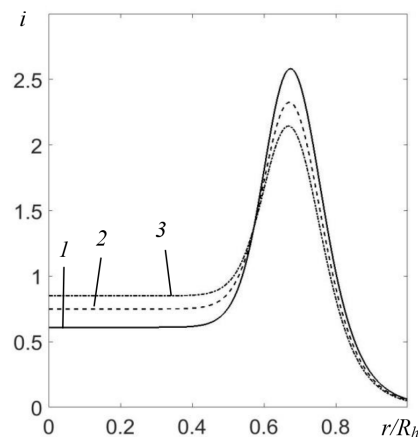


Рис. 7. Распределение относительной плотности орошения i по относительному радиусу сечения струи r/R_h при давлении жидкости $P_{ж}$, МПа: 1 – 0,2; 2 – 0,6; 3 – 1,0

Fig. 7. Distribution of the relative irrigation density i over the relative radius of the jet section r/R_h at a liquid pressure $P_{ж}$, МПа: 1 – 0.2; 2 – 0.6; 3 – 1.0

Для интерполяции результатов измерения использовали следующую функцию:

$$i = \frac{a}{1 + b\left(\frac{r}{R_h}\right)^k} - \frac{c}{1 + d\left(\frac{r}{R_h}\right)^k}, \quad (6)$$

где a, b, c, d, k – константы.

Сравнение кривых (рис. 6 и 7) показывает, что распределение скорости капель на участке дробления с высокой плотностью орошения не связано с распределением плотности орошения, это независимые параметры. Отсюда следует, что распределение абсолютной скорости капель одинаково для любого распределения плотности орошения и скорость может быть определена по формуле (5). Вероятно, что это справедливо только в области дробления жидкости на капли при высокой средней плотности орошения.

На основе полученных результатов разработана теоретическая модель определения скорости течения жидкости и газа на участке дробления жидкости центробежно-струйной форсункой. Рассмотрим участок, на котором плотность орошения высока настолько, что скорости жидкости и газа можно принять равными между собой:

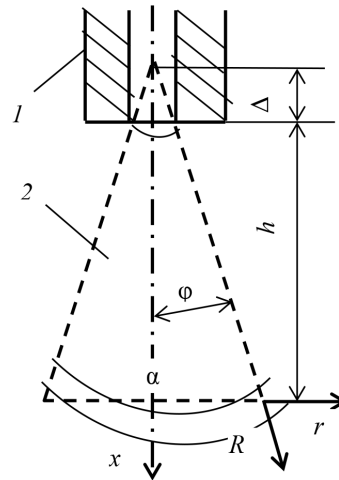
$$u_x = v_x \quad u_r = v_r; \quad (7)$$

где u – скорость жидкости; v – скорость газа; x и r – индексы осей цилиндрических координат.

На рис. 8 представлена схема истечения жидкости из сопла на участке дробления.

Рис. 8. Схема истечения жидкости из сопла центробежно-струйной форсунки: 1 – сопло форсунки; 2 – область дробления струи

Fig. 8. Diagram of liquid flow from the snout of a centrifugal-jet nozzle: 1 – snout of the nozzle; 2 – area of splitting the jet



Из сопла вытекает сплошная струя жидкости, область дробления которой имеет форму цилиндрического конуса. На схеме использованы цилиндрические координаты, соответствующие условиям измерения, и сферические координаты, необходимые для анализа результатов измерений.

Используя условие (7), запишем уравнение сохранения количества движения газожидкостной струи в интегральном виде:

$$\rho_{\text{ж}} \int_0^{r_c} u_{xc}^2 r \partial r = \int_0^{r_h} (\rho_{\text{ж}} \beta u_x^2 + \rho_{\text{г}} v_x^2) r \partial r, \quad (8)$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{г}}$ – плотность жидкости и газа соответственно; r_c – радиус отверстия сопла; u_{xc} – скорость жидкости в сечении сопла; β – объемное содержание жидкости; u_x – скорость жидкости; v_x – скорость газа.

Как следует из рис. 8, снижение скорости жидкости в направлении радиуса струи может быть связано с увеличением длины пути жидкости до сечения h на границе струи. Рассмотрим это более подробно. Предположим, что на одинаковом расстоянии от сопла, по поверхности сферы радиусом R , скорость движения капель u_{aR} тоже одинакова:

$$u_{aR} = \text{const}. \quad (9)$$

В этом случае дополнительное торможение происходит на расстоянии ΔR , которое определяется формулой

$$\Delta R = h \left(\frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right). \quad (10)$$

При условии (9) торможение на участке ΔR должно быть равно изменению скорости по радиусу – формула (5). Расчеты по уравнению (8) для условий экспериментальных измерений показали, что изменение скорости по радиусу действительно связано с увеличением длины пути. Разница между расчетной и экспериментальной скоростью составила 4,16 %, что сравнимо с ошибкой измерения.

Из этого следует, что изменение скорости обусловлено торможением, вызванным эжекцией газа, а неравномерность распределения скорости жидкости, определенную формулой (5), можно считать возникающей при истечении жид-

кости из сопла. Полученный результат подтверждает правомерность применения уравнений (5) и (7) для всей области дробления струи.

Чтобы воспользоваться уравнением (5), необходимо найти максимальную скорость жидкости в сечении сопла, которая связана с давлением жидкости перед форсункой $P_{ж}$. Известна формула для определения средней скорости жидкости [12]:

$$\bar{u}_{xc} = \mu \sqrt{\frac{2P_{ж}}{\rho_{ж}}}, \quad (11)$$

где μ – коэффициент расхода жидкости.

Используя эмпирическое уравнение (5), получим выражение для осевой составляющей скорости жидкости:

$$u_{xc} = u_{am} (\cos \varphi)^2. \quad (12)$$

где u_{am} – абсолютная максимальная скорость жидкости в плоском поперечном сечении струи.

Учитывая постоянство расхода жидкости в газожидкостной струе и полученное уравнение (12), определяем зависимость средней скорости истечения жидкости из сопла от максимальной скорости абсолютного движения жидкости:

$$\bar{u}_{xc} = \frac{2}{R} u_{amc} \int_0^R (\cos(\varphi))^2 r dr, \quad (13)$$

где u_{amc} – абсолютная максимальная скорость жидкости в плоском поперечном сечении сопла.

Полученное уравнение (14) можно проинтегрировать и представить в следующем виде:

$$\bar{u}_{xc} = u_{amc} \frac{\ln \left(1 + \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)^2 \right)}{\left(\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)^2}. \quad (14)$$

Учитывая равенства (11) и (14), получим искомое уравнение для определения максимального значения скорости:

$$u_{amc} = \mu \frac{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2}{\ln \left(1 + \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2 \right)} \sqrt{\frac{2P_{ж}}{\rho_{ж}}}. \quad (15)$$

Адекватность полученных уравнений подтверждают сравнения расчетов значений u_{amc} , использованных для построения интерполяционных кривых на рис. 6, с результатами измерений.

Выводы

1. Проведено экспериментальное измерение скорости движения капель, образующихся при дроблении жидкости в центробежно-струйной форсунке.
2. Получена функция распределения скорости капель в сечении струи жидкости.
3. Установлено, что распределение скорости капель в области их дробления не зависит от распределения относительной плотности орошения.

4. Построена математическая модель, которая позволяет определять скорости течения газа и жидкости в области дробления струи на капли центробежно-струйной форсункой в струйных газопромывателях целлюлозного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анискин С.В. Струйный эффект очистки газа в прямоточном распылительном аппарате // ЖПХ. 2010. Т. 83, № 6. С. 966–970. [Aniskin S.V. Jet Effect of Gas Treating in a Uniflow Sprinkling Apparatus. *Zhurnal Prikladnoi Khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2010, vol. 83, no. 6, pp. 966–970]. DOI: [10.1134/S1070427210060170](https://doi.org/10.1134/S1070427210060170)

2. Анискин С.В. Проблема развития систем газ–жидкость в ЦБП и возможность применения струйных газопромывателей // Целлюлоза, бумага, картон. 2016. № 1. С. 56–62. [Aniskin S.V. The Problem of Development of Gas-Liquid Systems in the Pulp and Paper Industry and the Possibility of Using Jet Scrubbers. *Tsellyuloza, bumaga, karton*, 2016, no. 1, pp. 56–62].

3. Анискин С.В. Столкновение капель при распыливании жидкости в струйном газопромывателе // Междунар. науч. период. изд. по итогам междунар. науч.-практ. конф. МНПК–66 «Новая наука: от идеи к результату». Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. № 2-3. С. 152–155. [Aniskin S.V. Collision of Droplets during Liquid Atomization in a Jet Scrubber. *International Scientific Periodical Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference MNPК-66 “New Science: From Idea to Result”*. Sterlitamak, AMI Publ., 2016, no. 2-3, pp. 152–155].

4. Анискин С.В., Куров В.С. Исследование условий десорбции сероводорода при дроблении жидкости центробежно-струйной форсункой // Вестн. СПбГУТД. Сер. 1. 2018. № 4. С. 55–60. [Aniskin S.V., Kurov V.S. The Study of Hydrogen Sulfide Desorption Conditions during the Fragmentation of the Liquid by Centrifugal-Jet Nozzle. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 1* [Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical science], 2018, no. 4, pp. 55–60].

5. Братчиков Г.Г. Очистка газовых выбросов в целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 255 с. [Bratchikov G.G. *Purification of Gas Emissions in the Pulp and Paper Industry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 255 p.].

6. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с. [Galustov V.S. *Direct-Flow Spraying Apparatuses in Heat Power Engineering*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 240 p.].

7. Галустов В.С., Анискин С.В., Михайлов Е.А. Распыливающие устройства с заполненным факелом для орошения тепло- и массообменных аппаратов. Обзорная информация. Сер. ХМ-1. М.: Химия, 1984. 33 с. [Galustov V.S., Aniskin S.V., Mikhaylov E.A. Spraying Devices with a Filled Flare for Irrigation of Heat and Mass Transfer Apparatuses. *Overview Information. Series KhM-1*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 33 p.].

8. Гусакова М.А., Цыганов С.П., Мискевич И.В., Личутина Т.Ф. Экологическая оценка производства целлюлозно-бумажной продукции в ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК» // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2008. № 7. С. 70–75. [Gusakova M.A., Tsyganov S.P., Miskevich I.V., Lichutina T.F. Ecological Assessment of Pulp and Paper Production at Mondi Syktyvkar. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2008, no. 7, pp. 70–75].

9. Леончик Б.И., Маякин В.П. Измерения в дисперсных потоках. М.: Энергия, 1971. 248 с. [Leonchik B.I., Mayakin V.P. *Measurements in Dispersed Flows*. Moscow, Energiya Publ., 1971. 248 p.].

10. Личутина Т.Ф., Гусакова М.А., Вишнякова А.П. Оценка фактического состояния газовых выбросов в атмосферу на предприятиях ЦБП Северо-Запада России

в соответствии нормативам ЕС // Целлюлоза, бумага, картон. 2009. № 3. С. 69–74. [Lichutina T.F., Gusakova M.A., Vishnyakova A.P. Assessment of Real State of Gas Emissions into the Atmosphere at the Pulp and Paper Industry Enterprises of the North-West of Russia in Accordance with EU Standards. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2009, no. 3, pp. 69–74].

11. Наилучшие существующие технологии в целлюлозно-бумажной промышленности. СПб.: Экология и бизнес, 2004. 509 с. [*The Best Existing Technologies in the Pulp and Paper Industry*. Saint Petersburg, Ekologiya i biznes Publ., 2004. 509 p.].

12. Пажу Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 254 с. [Pazhi D.G., Galustov V.S. *Fundamentals of Liquid Spraying Techniques*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 254 p.].

13. Патент 2688761С1 Российская Федерация, МПК. В 01 D 47/4. Пенный массообменный аппарат / С.В. Анискин, А.Г. Запорожец; заявитель и патентообладатель С.В. Анискин, А.Г. Запорожец; № 2018144394/04; заявл. 14.12.2018; опубл. 22.05.2019, Бюл. № 15. [Aniskin S.V., Zaporozhets A.G. *Foam Mass Exchange Apparatus*. Patent RF, no. RU 2688761 C1, 2019].

14. Пен Р.З. Технология целлюлозы: в 2 т. Т. 1. Производство сульфатной целлюлозы. Красноярск: СибГТУ, 2000. 236 с. [Pen R.Z. *Pulp Technology*: In 2 Vol. Vol. 1. Sulphate Pulp Production. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2000. 236 p.].

15. Протодьяконова О.И., Анискин С.В., Кадашевич Ю.И. Влияние полидисперсного состава капель на гидродинамику газожидкостной струи // ЖПХ. 2001. Т. 74, № 12. С. 1994–2000. [Protod'yakonova O.I., Aniskin S.V., Kadashevich Y.I. Effect of Polydisperse Drop Composition on Hydrodynamics of Gas-Fluid Jet. *Zhurnal Prikladnoi Khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2001, vol. 74, no. 12, pp. 1994–2000]. DOI: [10.1023/A:1015546807859](https://doi.org/10.1023/A:1015546807859)

16. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 655 с. [Ramm V.M. *Absorption of Gases*. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 655 p.].

17. Ситтиг М. Защита окружающей среды в целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 280 с. [Sittig M. *Pulp and Paper Manufacture: Energy Conservation and Pollution Prevention*. Translated from English. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1977. 280 p.].

18. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. 1, ч. 1. Древесное сырье и производство полуфабрикатов. СПб.: ЛТА, 2002. 424 с. [*Technology of Pulp and Paper Production*: In 3 Vol. Vol. 1, Part 1. Wood Raw Materials and Production of Semi-Finished Products. Saint Petersburg, LTA Publ., 2002. 424 p.].

19. Торф А.И., Прохоров Б.В., Пасечник С.П., Максимов В.Ф. Пылеулавливание мокрым способом в сульфатно-целлюлозном производстве. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1980. Вып. 7. 32 с. [Torf A.I., Prokhorov B.V., Pasechnik S.P., Maksimov V.F. *Wet Dust Collection in Sulphate Pulp Production*. Moscow, VNIPIEIllesprom Publ., 1980, vol. 7, p. 32].

20. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. М.: Химия, 1975. 216 с. [Uzhov V.N., Val'dberg A.Yu. *Purification of Gases with Wet Filters*. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 216 p.].

21. Федеральный закон «Об охране окружающей среды»: от 10.01.2002 N 7-ФЗ. Доступ из правовой системы «КонсультантПлюс». [*Federal Law "On Environmental Protection" Dated on January 1, 2002 No. 7-FZ*].

22. Широков С.Н., Ермаков А.В. Современный подход к проектированию установок газоочистки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. № 1. С. 37–39. [Shirokov S.N., Ermakov A.V. The Current Approach to Designing Gas-Cleaning Equipment. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering], 2005, no. 1, pp. 37–39]. DOI: [10.1007/s10556-005-0054-1](https://doi.org/10.1007/s10556-005-0054-1)

23. Agrawal K.S. Performance of Venturi Scrubber. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2013, vol. 7, iss. 11, pp. 53–69.
24. Al-Sarkhi A., Hanratty T.J. Effect of Pipe Diameter on the Drop Size in a Horizontal Annular Gas–Liquid Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, vol. 28, iss. 10, pp. 1617–1629. DOI: [10.1016/S0301-9322\(02\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00048-4)
25. Beji T., Zadeh S.E., Maragos G., Merci B. Influence of the Particle Injection Rate, Droplet Size Distribution and Volume Flux Angular Distribution on the Results and Computational Time of Water Spray CFD Simulations. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 91, pp. 586–595. DOI: [10.1016/j.firesaf.2017.03.040](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.040)
26. Breton K., Fleck B.A., Nobes D.S. A Parametric Study of a Flash Atomized Water Jet Using a Phase Doppler Particle Analyzer. *Atomization and Sprays*, 2013, vol. 23, iss. 9, pp. 799–817. DOI: [10.1615/AtomizSpr.2013007728](https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2013007728)
27. Costa M.A.M., Ribeiro A.P.R.A., Tognetti É.R., Aguiar M.L., Gonçalves J.A.S., Coury J.R. Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream. *Materials Research*, 2005, vol. 8, no. 2, pp. 177–179. DOI: [10.1590/S1516-14392005000200016](https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000200016)
28. Das S.K., Biswas M.N. Studies on Ejector-Venturi Fume Scrubber. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol. 119, iss. 2-3, pp. 153–160. DOI: [10.1016/j.cej.2006.03.019](https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.03.019)
29. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. *Official Journal of the European Union*, 2008, pp. 1–44.
30. Fathikalajahi J., Taheri M., Talaie M.R. Theoretical Study of Nonuniform Droplets Concentration Distribution on Venturi Scrubber Performance. *Particulate Science and Technology*, 1996, vol. 14, iss. 2, pp. 153–164. DOI: [10.1080/02726359608906691](https://doi.org/10.1080/02726359608906691)
31. Fore L.B., Ibrahim B.B., Beus S.G. Visual Measurements of Droplet Size in Gas-Liquid Annular Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, vol. 28, iss. 12, pp. 1895–1910. DOI: [10.1016/S0301-9322\(02\)00121-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00121-0)
32. Gamisans X., Sarrà M., Lafuente F.J. Fluid Flow and Pumping Efficiency in an Ejector-Venturi Scrubber. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2004, vol. 43, iss. 2, pp. 127–136. DOI: [10.1016/S0255-2701\(03\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00104-1)
33. Gamisans X., Sarrà M., Lafuente F.J., Azzopardi B.J. The Hydrodynamics of Ejector-Venturi Scrubbers and Their Modelling by an Annular Flow/Boundary Layer Model. *Chemical Engineering Science*, 2002, vol. 57, iss. 14, pp. 2707–2718. DOI: [10.1016/S0009-2509\(02\)00171-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00171-9)
34. Gonçalves J.A.S., Costa M.A.M., Aguiar M.L., Coury J.R. Atomization of Liquids in a Pease-Anthony Venturi Scrubber: Part II. Droplet Dispersion. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, vol. 116, iss. 1-2, pp. 147–157. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2004.08.030](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.030)
35. Guerra V.G., Gonçalves J.A.S., Coury J.R. Experimental Investigation on the Effect of Liquid Injection by Multiple Orifices in the Formation of Droplets in a Venturi Scrubber. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 16, iss. 1, pp. 351–359. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2008.03.101](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.101)
36. Han Z., Liu B., Yang S., Pan X., Yan Z. NO_x Removal from Simulated Marine Exhaust Gas by Wet Scrubbing Using NaClO Solution. *Journal of Chemistry*, 2017, vol. 2017, art. 9340856. DOI: [10.1155/2017/9340856](https://doi.org/10.1155/2017/9340856)
37. Harry-Ngei N., Ubong I., Ede P.N. A Review of the Scrubber as a Tool for the Control of Flue Gas Emissions in a Combustion System. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2019, vol. 4, no. 11, pp. 1–4. DOI: [10.24018/ejers.2019.4.11.1561](https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.11.1561)
38. Jet Scrubbers. *Official Website of the GEA Group Aktiengesellschaft*. 2020. Available at: <https://www.gea.com/en/products/emission-control/gas-scrubbers/jet-scrubbers.jsp> (accessed 05.12.20).

39. Kandar T.K., Vhora S.F., Iyer K., Prabhu S.V. Experimental Investigation of the 700 MWe Containment Spray System Spray Nozzles/System. *Atomization and Sprays*, 2017, vol. 27, iss. 8, pp. 665–690. DOI: [10.1615/AtomizSpr.2017019352](https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2017019352)
40. Pak S.I., Chang K.S. Performance Estimation of a Venturi Scrubber Using a Computational Model for Capturing Dust Particles with Liquid Spray. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, vol. 138, iss. 3, pp. 560–573. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2006.05.105](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.105)
41. Puentes N.A.G., Zoccal J.V.M., Guerra V.G., Coury J.R., Gonçalves J.A.S. Use of a Short Duration Electronic Flash in the Study of the Trajectory of Liquid Jet in a Pease-Anthony Venturi Scrubber. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 660-661, pp. 537–542. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.537](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.537)
42. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modeling of Heat and Mass Transfer and Absorption-Condensation Dust and Gas Cleaning in Jet Scrubbers. *Mass Transfer – Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling*. Ed. by H. Nakajima. Rijeka, Croatia, InTech, 2013, pp. 163–194. DOI: [10.5772/53094](https://doi.org/10.5772/53094)
43. Srilatha C., Morab V.V., Mundada T.P., Patwardhan A.W. Relation between Hydrodynamics and Drop Size Distributions in Pump–Mix Mixer. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, iss. 11, pp. 3409–3426. DOI: [10.1016/j.ces.2010.02.035](https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.02.035)
44. Sundararaj S., Selladurai V. Flow and Mixing Pattern of Transverse Turbulent Jet in Venturi-Jet Mixer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 3563–3573. DOI: [10.1007/s13369-013-0643-9](https://doi.org/10.1007/s13369-013-0643-9)
45. Tran T.A. Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships. *Journal of Marine Science: Research & Development*, 2017, vol. 7, iss. 6, art. 243. DOI: [10.4172/2155-9910.1000243](https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000243)
46. Yoon S.S. Droplet Distribution at the Liquid Core of a Turbulent Spray. *Physics of Fluids*, 2005, vol. 17, iss. 3, art. 035103. DOI: [10.1063/1.1852577](https://doi.org/10.1063/1.1852577)

DYNAMIC BEHAVIOR OF LIQUID FLOW RATE FROM NOZZLES IN JET SCRUBBERS OF PULP PRODUCTION

Sergei V. Aniskin, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

Victor S. Kurov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: V-7289-2017,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: asv-47@mail.ru, vskurov18@mail.ru

Abstract. It is shown that the modern development of pulp production technology is associated with the development of gas-liquid systems equipment. Such equipment provides the main technological processes of pulp cooking and regeneration of chemical reagents. Furthermore, this equipment, designed to recover chemical reagents and reduce their emissions into the environment, is part of the technological process. The use of scrubbers in pulp production has an advantage over many other industries, since it uses a closed liquor regeneration cycle. Currently, studies of the processes occurring in scrubbers of different types are becoming more numerous and fundamental. This paper is devoted to the development of jet scrubbers. These devices have a number of properties that do not have scrubbers of other types. They do not create resistance to the gas flow in the flue; they have a gravitational property due to ejection. Only jet scrubbers create the necessary conditions for the stability of the gas flow and have a jet effect that allows to significantly increase the efficiency of emissions cleaning. To implement the jet effect and intensify the technological equipment operation it is required to describe transfer processes in jet scrubbers with regard to polydisperse structure of drop

flow and features of liquid splitting up into drops by centrifugal-jet nozzles. Scientific works devoted to the problem of realization of the jet effect showed the need to study the dynamics of liquid splitting in centrifugal-jet nozzles, which create a drop-filled jet with a large opening angle. The research purpose is to study the speed of the initial movement of drops in the area immediately after the splitting section of the continuous jet of liquid flowing from the nozzle. A photographic technique with two spark lamps was used for the experiment. At the same time, the distribution of irrigation density was controlled. The results of measuring the distributions of absolute speed of drops and irrigation density were compared with each other and the function of liquid speed distribution in the cross section of the gas-liquid jet of the jet scrubber was determined. Based on the obtained data, a theoretical model was developed to determine the initial speed of drops of centrifugal jet nozzles, an indicator required for the development of new jet scrubbers. The results can be applied to improve the technological processes of pulp production.

For citation: Aniskin S.V., Kurov V.S. Dynamic Behavior of Liquid Flow Rate from Nozzles in Jet Scrubbers of Pulp Production. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 180–193. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-180-193

Keywords: pulp production, gas-liquid equipment, jet scrubber, jet, drops.

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

Поступила 05.03.20 / Received on March 5, 2020

УДК 519.2+519.6:541.64:544.23.02:547.458.84

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-194-212

ФАКТОР НЕИДЕАЛЬНОСТИ В ЭНТРОПИЙНО-МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ САМООРГАНИЗОВАННЫХ СТРУКТУР РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ (ЛИГНИНОВ)

Н.А. Макаревич^{1,2}, д-р хим. наук, проф.; *ResearcherID: [ABF-6367-2020](https://orcid.org/0000-0002-9595-0345)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9595-0345>

¹Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», просп. Независимости, д. 220, Минск, Республика Беларусь, 220000; e-mail: nikma@tut.by

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

Аннотация. Предложено ввести обобщенный фактор неидеальности систем g в уравнения информационной энтропии, описывающие самоорганизованные структуры существенно неравновесных систем с приложением для изучения топологических свойств высокомолекулярных соединений в растворах на примере лигнинов древесины. Фактор g как относительная термодинамическая характеристика связывает идеальную и реальную модели систем, в которых можно выделить два конкурентных (противоположных по знаку и действию) процесса: порядок (–) ↔ хаос (+); притяжение (–) ↔ отталкивание (+); сжатие (–) ↔ расширение (+); кластеризация (–) ↔ распад (+) и т. д. Фактор $g = 1 + \langle -\beta_{ord} + \alpha_{nord} \rangle = 1 + \langle -p_i(\beta) + p_i(\alpha) \rangle$, где $-\beta_{ord} \equiv 1/n \sum_i^n \beta_i$ и $\alpha_{nord} \equiv 1/n \sum_i^n \alpha_i$ – относительные средние характеристики (p_i – статистические вероятности) противоположно протекающих процессов. Фактор g изменяется в интервале $0 \leq g \leq 1$ и зависит от того, какой из конкурентных процессов превалирует. При $\alpha_{nord} = 0$ $g \rightarrow 0$, при $\beta_{ord} = 0$ $g \rightarrow 2$, при $g = 1$ ведение элементов системы будет идеальным. Фактор g вводится в любые классические уравнения, пригодные для изучения идеальных систем, в целях использования их для описания реальных систем (например, в уравнения Генри, Рауля, Вант-Гоффа, состояния идеального газа и т. д.). Строго математически фактор g определен через величины M – мера, ε – масштаб, d – размерность в виде отношения логарифмов мер реального (M^*) и идеального (M_0) состояний объекта: $g = \ln M^* / \ln M_0 = d/D$, где M^* и M_0 может быть N_d – число элементов в структуре фрактального реального (например, кластера) или математического (например, салфетка Серпинского) объекта и N_D – число элементов в структуре объекта в идеальном состоянии, обладающих свойством многомасштабности и самоподобия (d и D – фрактальная и евклидова размерности). Как термодинамическая характеристика g_{th} определяется отношением термодинамических функций, функционалов, например, $\Delta G_i^* / \Delta G_i$, где $\Delta G_i^* = -RT \ln a_i$ – и $\Delta G_i = -RT \ln N_i$ – для реального и идеального состояний; количеством молей n^* – реального состояния вещества к n – идеального; относительными энтропиями системы $\Delta S_{real} / \Delta S_{id}$. Получены новые выражения информационных и термодинамических энтропий с дольным (0...1) моментом порядка – энтропийным g_S и термодинамическим g_{th} факторами неидеальности для анализа самоорганизованных квазиравновесных структур в формализме Реньи: $S_{g_S}^{M-Rn}(p) = \frac{R}{1-g_S} \ln \sum_i^N p_i^{g_S}$; $S_{g_{th}}^{M-Rn} = \frac{R}{g_{th}} \ln \left(\sum_{i=1}^N p_i^{g_{th}-1} \right)$. В формализме Тсаллиса $S_{g_S}^{M-Ts}(p) = \frac{R(1-\sum_i^{N(\varepsilon)} p_i^{g_S})}{g_S-1}$; $S_{g_{th}}^{M-Ts}(p) = \frac{R(1-\sum_i^{N(\varepsilon)} p_i^{1-g_{th}})}{g_{th}}$ с приложением для изучения топологических свойств высокомолекулярных соединений методами гидродинамики, а также термодинамики растворов полимеров.

Для цитирования: Макаревич Н.А. Фактор неидеальности в энтропийно-мультифрактальном анализе самоорганизованных структур растительных полимеров (лигнинов) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 194–212. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-194-212

Ключевые слова: фактор неидеальности систем, фрактальные структуры, фрактальная размерность, информационная и термодинамическая энтропия, растворы полимеров, термодинамика растворов полимеров, лигнины.

Введение

В современном мире поиск глобальных инноваций приобретает решающее значение для ресурсосберегающего использования возобновляемой растительной биомассы и создания новых методов комплексной утилизации ее основных компонентов: полисахаридов, лигнина, экстрактивных веществ. Лигнин – основной компонент древесины и травянистых растений – в настоящее время рассматривается в биоэкономике [35] как уникальный объект для создания разнообразных высокотехнологичных химических продуктов [4, 21]. Рефайнинг лигнина в производстве материалов и химических веществ для высокоэффективного применения требует развития фундаментальных научных исследований в различных направлениях [4, 9]:

структурная организация и свойства лигноуглеводной матрицы и ее компонентов;

процессы делигнификации древесины в органических и смешенных растворителях;

получение адсорбентов нового поколения и т. д.

Одним из наиболее перспективных научных направлений может стать энтропийно-мультифрактальный подход в изучении сложных самоорганизованных структур [3, 8, 12, 13, 31], к каким относятся растительные полимеры, включая лигнин. Лигнин рассматривается как типичный нанообъект для исследования фрактальной природы биомакромолекул и макромолекул с элементами дендритной структуры.

Новым в этом подходе явилось то, что в нем впервые использован предложенный нами фактор неидеальности систем (g), с помощью которого открываются принципиально новые возможности как для термодинамической теории реальных растворов полимеров, так и для теории и практики любых процессов, протекающих на межфазных границах.

Цель исследования – получение новых уравнений информационной и термодинамической энтропии с фактором неидеальности для термодинамического анализа реальных квазиравновесных и открытых систем, в том числе для анализа процессов самоорганизации при биосинтезе природных полимеров, включая лигнины.

Теоретическое обоснование методологии энтропийно-мультифрактального подхода в анализе самоорганизованных структур растительных полимеров

Энтропийно-фрактальный подход – один из универсальных инструментов анализа сложных открытых систем самой разной природы [5, 7, 18, 31], оперирующий взаимно дополняющими понятиями: энтропия (S) как мера хаотичности и как мера недостающей информации о состоянии системы; фрактал с

его ключевой характеристикой (d – фрактальная размерность) – предельно упорядоченная, самоподобная и масштабно инвариантная структура [5, 18].

В открытых (реальных) термодинамических системах, обменивающихся энергией и негэнтропией с внешней средой, протекают благодаря информационному управлению процессы спонтанного формирования сложных, как правило, фрактальных структур [13, 30].

В работе предпринята попытка ввести обобщенный фактор неидеальности систем $g \equiv \text{GNF}$ (generalized non-ideality factor of systems) в уравнения информационной энтропии [14, 32, 34], описывающие самоорганизованные структуры существенно неравновесных систем (т. е. фрактальные структуры) с приложением к изучению топологических свойств высокомолекулярных соединений, в частности лигнинов [4, 9–11, 26, 27]. Используя характеристики GNF в энтропийно-фрактальном анализе, можно значительно расширить практические и теоретические возможности этого стремительно развивающегося математического аппарата.

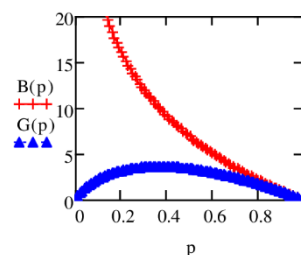
Для обоснования связи между S , d и g с получением новых моделей (уравнений) информационно-термодинамических энтропий потребуется проанализировать положения современной энтропийно-фрактальной теории.

1. *Энтропия и информация – основа традиционного подхода в изучении сложных систем.* Связь между энтропией и информацией была установлена в основополагающей работе Сциларда [33]. В дальнейшем в работах [3, 17, 24] сформулирован негэнтропийный принцип информации, обобщающий второе начало термодинамики, согласно которому как энтропия, так и информация должны рассматриваться и трактоваться совместно [13, 24].

В статистической теории открытых систем только энтропия обладает совокупностью свойств, которые позволяют использовать ее в качестве количественной меры статистической неопределенности в микросостояниях системы [3, 5, 7, 12]. Применение информационного подхода к статистической механике [8, 12, 13, 24] позволило по-новому обосновать равновесное распределение Гиббса [3] и построить неравновесную термодинамику систем [7, 8] на принципе условного максимума информационной энтропии Гиббса–Шеннона [3, 8]. Информационная энтропия Гиббса–Шеннона S^{G-H} , являющаяся математическим ожиданием неопределенности в состояниях физической системы, интерпретируется в теории информации как мера неупорядоченности системы (статистического хаоса) и вместе с тем как мера структурной организованности системы (мера недостатка информации о действительной структуре системы), вытекает из формулы Л. Больцмана при условии равновероятности всех W состояний системы (микрочанонический ансамбль) (рис. 1): $p_i = p_w = 1/W$ (для всех $i = 1, 2, \dots, W$): $S_w^B = -\ln p_w$.

Рис. 1. Вид зависимостей энтропий $B(p) \equiv S^B$ и $G(p) \equiv S^{G-H}$ от вероятности p

Fig. 1. Dependencies of the Boltzmann entropy $B(p) \equiv S^B$ and the Shannon entropy $G(p) \equiv S^{G-H}$ on the probability p



Для различных вероятностей p_i вводится ансамбль микроканонических i -х подсистем, для которых все W_i имеют равные вероятности p_i с энтропией Больцмана: $S_i^B = -\ln p_i$.

Усреднение энтропий $\langle S_i^B \rangle$ (математическое ожидание) приводит к информационной энтропии Гиббса–Шеннона: $S^{G-H} = \langle S_i^B \rangle p = -\sum_i^W p_i \ln p_i$.

Каноническое распределение Гиббса – распределение состояний макроскопической термодинамической системы частиц, находящихся в тепловом равновесии с окружающей средой. Через плотность распределения каноническое распределение Гиббса представляют [3, 13, 30] как $p_i = \frac{e^{-\beta H_i}}{Z}$, где $\beta = 1/kT$; k – константа Больцмана; T – термодинамическая температура; $H = \{H_i\}$ – гамильтониан; $Z = \sum_i e^{-\beta H_i}$.

Большинство систем, находящихся в термодинамическом равновесии, подчиняются статистике Больцмана–Гиббса с ее тремя ключевыми положениями:

определение функционала энтропии $S = -\sum_i k p_i \ln p_i$ (при условии $\sum_i p_i = 1$ и $\sum p_i H_i = U$ для канонического ансамбля, U – внутренняя энергия);

форма равновесного распределения $p_i = \frac{e^{-\beta H_i}}{Z}$;

связь с термодинамическими потенциалами G или F : $F = -(1/\beta) \ln Z$ и $U = -(\partial/\partial\beta) \ln Z$.

Однако многие неравновесные системы и системы с «медленной динамикой» обнаруживают асимптотически степенные статистические распределения [16, 22, 24, 30, 34]. В неравновесной термодинамике при описании существенно неравновесных систем (компонентов древесины – целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина), связанных с процессами самоорганизации структур, предложены альтернативные формы информационных энтропий [22, 34]. При изучении сложных систем и процессов (например, фрактальных и самоорганизующихся структур лигнинов, явления турбулентности и т. д.), в отличие от экспоненциального распределения Гиббса, эффективнее «работают» степенные распределения. Например, энтропия Хаврда–Чарвата–Тсаллиса [34]:

$$Ts(p) = \frac{1 - \sum_i^n p_i^{q'}}{1 - q'} = \frac{1 - \sum_i^n p_i^q}{q - 1}, \quad (1)$$

в которой К. Тсаллис [34] энтропию в уравнении Гиббса–Шеннона без теоретического обоснования заменил на энтропию $-\sum_i^n p_i^{q'} \ln p_i$ со степенным показателем $q' = 1/q$, т. е. преобразовал параметр $\frac{1}{1-q}$, взятый из уравнения информационной энтропии Реньи ($R_n(p)$) [32]

$$R_n(p) = \frac{1}{1-q} \ln \sum_i^n p_i^q, \quad (2)$$

в параметр $q'/(q'-1)$.

В уравнениях (1) и (2) q и q' – моменты меры ϵ -разбиения (покрытия).

Энтропия Реньи – семейство функционалов, определяющих разнообразие случайности в состоянии системы. Задавая q – действительное число, удовлетворяющее требованиям $q \geq 0$, $q \neq 1$, находят энтропию с q -статистикой по формуле $S_q = S_q(X)$, при этом $p_i = P(X = x_i)$ – вероятность события, состоящего в том, что дискретная случайная величина X окажется равна своему соответствующему возможному значению; n – общее число различных возможных значений случайной величины X . При $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1/n$ энтропии Реньи

равны $S_q(X) = \ln n$ [3]. Кроме абсолютных энтропий Реньи определяется спектр мер дивергенций (3), обобщающих расхождение Кульбака–Лейблера (так называемая относительная энтропия, или мера того, насколько одно распределение вероятностей отличается от второго эталонного распределения вероятностей) [3, 28].

Отличительной особенностью термостатистики Реньи является то, что в соответствии со вторым началом термодинамики соблюдается условие максимальной энтропии. И, что очень важно, при переходе от термостатистики Гиббса наблюдается фазовый переход упорядочения в системе при максимально возможном значении порядка $\eta = -q$, т. е. когда эволюция системы идет в направлении развития спонтанной самоорганизации, сопровождаемой ростом термодинамической энтропии. При этом распределение Реньи [3, 8] в случае степенного гамильтониана становится степенным, а энтропия $R_n(p)$, как и в термодинамике Гиббса, обладает свойством аддитивности, т. е. экстенсивна: $S(W_1W_2) = S(W_1) + S(W_2)$, тогда как энтропия Тсаллиса $Ts(p)$ – неэкстенсивна: $S(W_1W_2) \neq S(W_1) + S(W_2)$.

Последнее интерпретировано [22, 33] как необходимое условие при изучении различных неэкстенсивных систем и построении новой термодинамики и новой статистической теории для описания системы с длинной памятью и системы, каждый элемент которой взаимодействует не только с ближайшими соседями, но и со всей системой в целом или ее частями (например, космические гравитирующие системы: звездные скопления, туманности, галактики, скопления галактик и т. п.) [7, 8, 22]. Аналогичные взаимодействия наблюдаются в природных системах растительного и животного происхождения, включая компоненты древесины [4, 10].

Важно, что энтропия Тсаллиса, как и энтропия Реньи, является обобщением энтропии Кульбака–Лейблера $D_{KL} \equiv S(p||q)$ (относительная энтропия, выступающая как дивергенция и служащая для оценки «информационного расстояния» – расстояния между двумя плотностями распределения $p(x)$ и $q(x)$ в массивах X и Y) [28]:

$$S(p||q) = \sum_{x \in X} p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)}. \quad (3)$$

Как мера различия двух сравниваемых распределений $S(p||q)$ должна быть задана на одном и том же домене, например макромолекуле лигнина [7, 10, 16].

Изучение физической информации различия Кульбака, как и меры упорядоченности микросостояний при переходах, позволяет ответить на главные вопросы самоорганизации открытых систем [7]. Дивергенция D_{KL} как математическое ожидание применяется для изучения открытых неравновесных термодинамических систем [7, 28], к которым относятся исследуемые гидродинамические системы, сложные по структуре и поведению, образованные лигнинами [9, 10].

Относительно энтропии Реньи $R_n(p) \geq 0$, она, возрастая при $q = 1$, переходит в энтропию $S^{G-H}(p)$ и в распределение Гиббса в результате предельного перехода $\lim_{q \rightarrow 1} R_n = S^G$ и в энтропию S^B при любых q для равновероятных распределений p . Параметр порядка Реньи $\eta = 1 - q$ превращается в 0 и распределение Реньи [3, 12] $P_q^{Rn} = \sum_i^W (1 - (\beta(q - 1)/q)) \Delta H_i^{1/(q-1)}$, где $\Delta H_i = H_i - U$ переходит в распределение Гиббса, кроме того, R_n переходит и в энтропию T_s при условии $|1 - q| = 1$ [3].

Эскортное распределение $P_q^{Ts} = \sum_i^W p_i^q$ с дополнительным условием усреднения $U = \langle H \rangle_{es} \equiv \sum_i \Delta H_i P_{qi}$ в неэкстенсивной термостатистике Тсаллиса [34, 3] представлено в виде $P_q^{Ts} = Z_T^{-1} (1 - (\beta'(1 - q')) \Delta H)^{q'/(q'-1)}$, где $\beta' = 1/kU$ [3].

Для наглядности на рис. 2–4 показаны теоретические зависимости энтропий R_n (2) и T_s (1) от p и $q \equiv q'$ (для q и q' числовые значения заданы одинаково), отражающие характерные особенности сравниваемых моделей.

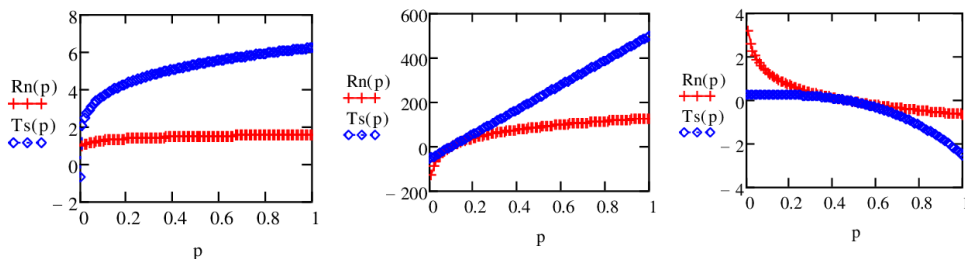


Рис. 2. Зависимости энтропий R_n (2) и T_s (1) от вероятности p (слева направо: фиксированные значения $q = 0,2; q = 0,99; q = 3$)

Fig. 2. Dependences of the Rényi entropy R_n (2) and the Tsallis entropy T_s (1) on p (from left to right: fixed values of dimensionless quantity $q = 0.2, q = 0.99, q = 3$)

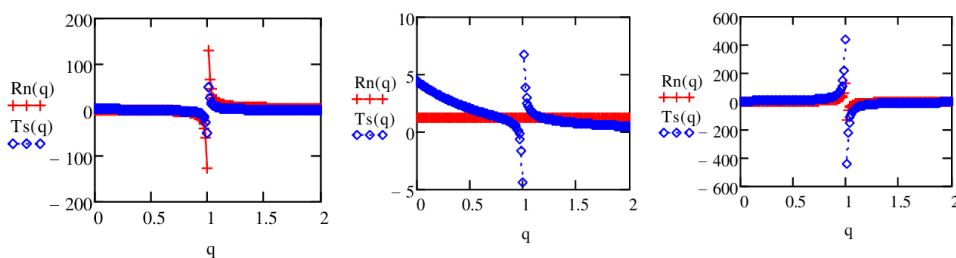


Рис. 3. Зависимости R_n (2) и T_s (1) от q (слева направо: $p = 0,01, p = 0,1$ (для R_n – особый случай), $p = 1$)

Fig. 3. Dependences of R_n (2) and T_s (1) on q (from left to right: $p = 0.01, p = 0.1$ (special case for R_n), $p = 1$)

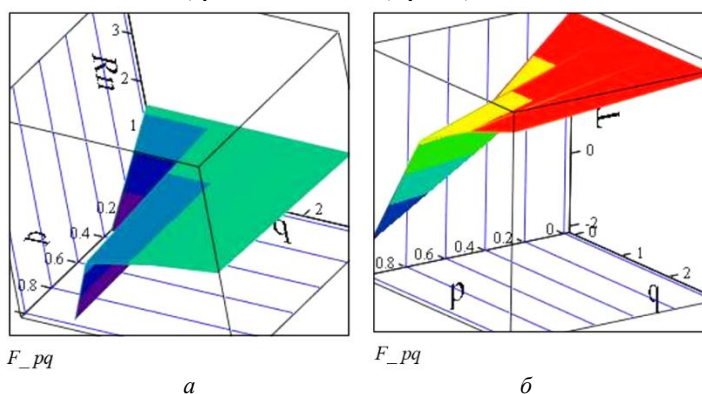


Рис. 4. Функциональная зависимость F_{pq} энтропии: a – Реньи S^{Rn} и b – Тсаллиса S^{Ts} от p и q

Fig. 4. Functional dependence F_{pq} of the a – Rényi S^{Rn} and b – Tsallis S^{Ts} entropies on p and q

Представленные на рис. 2–4 зависимости R_n и T_s от p и q наглядно показывают принципиальные закономерности:

при изменении q в интервале от 0 до 1 ($q \neq 1$) в модели Реньи для всех значений q энтропия по абсолютной величине возрастает медленно и достигает максимального значения вблизи $q = 1$, в то время как абсолютные величины энтропии в модели Тсаллиса растут значительно быстрее, т. е. по степенному закону;

при $q = 1$ (особый случай) функционалы энтропий в обеих моделях разрываются (причина тому форма выражения параметров $\frac{1}{1-q}$ и $\frac{q'}{q'-1}$), что обусловлено переходом от упорядочения элементов системы к разупорядочению, при этом энтропия Реньи при единственном вероятностном состоянии ($p = 0,1$) не зависит от q .

При переходе от информационной энтропии (1), (2) к термодинамической, для придания ей физического смысла в уравнения (1), (2) необходимо ввести множители в виде констант Больцмана k_B (для одной молекулы) или универсальной газовой постоянной R (для 1 моля).

2. *Связь фрактальной размерности и энтропии.* Если исследуемая система – реальный объект, обладающий свойством многомасштабности и самоподобия, т. е. фрактальными свойствами, то с изменением масштаба ε выполняется степенная зависимость

$$N(\varepsilon) = \varepsilon^{-d},$$

где N – число элементов в структуре объекта (например, кластера), базовые элементы покрытия; ε – размер ячейки разбиения фазового пространства (например, ε с радиусом инерции R_g элемента разбиения кластера); d – фрактальная размерность Хаусдорфа–Безиковича, строго больше топологической [18].

Фрактальным объектом может быть макромолекула с линейной, звездобразной, хаотически разветвленной структурой в глобулярной или клубкообразной конформации и с конформационным размером – R [10]. Для геометрического фрактала ε -разбиение для россыпи точек – a^0 , длины кривой $l - a^1$, площади $s - a^2$, объема $V - a^3$, где 0, 1, 2, 3 – евклидова размерность D , совпадающая с топологической n , при которой минимальная кратность покрытия множества равна $n + 1$. Точный размер объекта $\{l, s, V\}$ может быть получен при переходе к следующему пределу:

$$\{l, s, V\} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} N(\varepsilon) \varepsilon^d = c, \quad 0 < c < \infty,$$

где c – некоторая постоянная.

Для n -го уровня самоподобного множества $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} N(\varepsilon) \varepsilon^d = c$.

В зависимости от выбора метода наблюдения, чувствительного к размеру или к числу частиц [14, 15], следует различать массовую фрактальную размерность d_m и численную (точнее, количественную) – d_n . Массовую фрактальную размерность выразим через плотность:

$$\rho = \rho_0 (R_m/r_{m,0})^{D-d_m},$$

количественную – через молярную концентрацию:

$$C_m = C_{m,0} (R_n/r_{n,0})^{D-d_n}.$$

$\varepsilon_m = R_m/r_{m,0}$, $\varepsilon_n = R_n/r_{n,0}$; R_n и $r_{n,0}$ – размеры объекта и его элементарного звена, соответственно, массовые и количественные характеристики фрактальных объектов.

Как известно, множество, порожденное сегментами равной длины с одним показателем скейлинга, – размерность Хаусдорфа–Безиковича [18] – задается строгим выражением

$$d_0 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln(N(\varepsilon)) / \ln(1/\varepsilon),$$

вытекающим из (4).

Поскольку структура реального объекта не строго самоподобна и нет необходимости в предельном переходе, то наклон линейной зависимости $d(\ln N(\varepsilon))$ от $d(\ln \varepsilon)$ с точностью до знака может определять величину фрактальной размерности:

$$d = d(\ln N(\varepsilon)) / d(\ln \varepsilon),$$

погрешность которой зависит от выбора нижней и верхней границ фрактального участка (так поступают при изучении фрактальных свойств лигнинов в растворах).

Например, определение «клеточной размерности» d_b связано с покрытием поверхности фрактала множеством квадратов a^2 равного размера. Число заполненных квадратов связано с размером ε по закону подобия, для строго самоподобных фракталов (например, линейные макромолекулы целлюлозы с высокой молярной массой) совпадает с хаусдорфовой d_0 .

При переходе к мультифрактальному анализу, т. е. к ансамблю, имеющему целый континуум фрактальных размерностей («нагруженный» фрактал – макромолекулы лигнина широкого полидисперсного состава), рассматривается предел

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\sum_{i=1}^N p_i^q \varepsilon_i^\tau)^n = c,$$

где $p_i(\varepsilon_i)$ – вероятность создания фрактала генератором ε на n -м уровне самоподобного множества с числом элементов, равным N_i^n , и множеством показателей $\tau = \tau(q)$, формирующим скейлинговое распределение кластеров по размерам. Подбирая q – момент меры ε -разбиения и τ такими, при которых предел остается при равенстве всех ε_i конечным, т. е. $\sum_{i=1}^N p_i^q \varepsilon_i^\tau = 1$, следует

$$\tau = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln(\sum_{i=1}^N p_i^q) / \ln(1/\varepsilon). \quad (4)$$

Если $q = 0$, то $\tau = d_0$ – размерность Хаусдорфа–Безиковича.

Связи фрактальных размерностей с энтропиями (Л. Больцмана, Дж. Гиббса, К. Шеннона, А.Н. Колмогорова, А. Реньи, К. Тсаллиса и др.) устанавливаются при рассмотрении предела

$$d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} S(a) / \ln(1/\varepsilon),$$

где в качестве энтропии $S(a)$ может выступать: S^B (Больцман); S^K (Колмогоров); S^R (Реньи); S^{Ts} (Тсаллис) и т. д.

Например, при $\tau(q) = d_q(q-1)$, где d_q – обобщенная фрактальная размерность Реньи [25], выражение (4) преобразуется в предел

$$d_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln(\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q) / \ln(1/\varepsilon), \quad (4a)$$

из которого в дискретном случае следует рассмотренная выше модель (2) – энтропия Реньи $S^R \equiv Rn$. В (4a) $N(\varepsilon)$ – минимальное число d -мерных кубиков со стороной a , необходимое для покрытия всех элементов структуры макромолекулы; $p_i(\varepsilon)$ – вероятность, что точка структуры будет принадлежать i -му элементу покрытия объема. Таким образом, устанавливается связь $S_q^{(R)} \approx \ln \varepsilon^{-d(q)}$

между энтропией и фрактальной размерностью – важнейшей характеристикой реальных объектов, включая природные, такие как лигины. В общем случае:

$$S(\varepsilon) \approx \ln \varepsilon^{-d}, \text{ т. е. } \varepsilon^{-d} \approx e^{S(\varepsilon)}.$$

3. *Обобщенный фактор неидеальности реальных систем в некоторых модельных представлениях (Реньи и Тсаллиса).* В энтропийно-фрактальный математический аппарат логично вписывается важный критерий реальных систем – обобщенный фактор неидеальности систем g (GNF) как относительная термодинамическая характеристика [14, 15], связывающая идеальную и реальную модели систем, в которых можно выделить два конкурентных (противоположных по знаку и действию) процесса: порядок (–) ↔ хаос (+); притяжение (–) ↔ отталкивание (+); сжатие (–) ↔ расширение (+); кластеризация (–) ↔ распад (+) и т. д. Численное значение g изменяется в интервале $0 \leq g \leq 1$ и будет зависеть от того, какой из конкурентных процессов превалирует; при $g = 1$ поведение элементов системы будет таким же, что и идеальной, прототипом которой она служит.

GNF вводится в классические уравнения (пригодные для изучения идеальных систем, процессов) в целях использования их для описания реальных систем, например в уравнения, отвечающие законам Генри ($P_{\text{осм.эксп}} = gP_{\text{осм}}$); Рауля ($\Delta P = gP_1^0 N_2$, $\Delta T_{\text{зам}} = gKm$, $\Delta T_{\text{кип}} = gEm$); Вант-Гоффа ($P_{\text{осм}} = gcRT$); Гиббса ($\Gamma_s = -(c/gRT)(\partial\sigma/\partial \ln c)_{T,p}$, где σ – поверхностное натяжение раствора) и многие другие уравнения (математические модели), описывающие поведение реальных физических систем в естественнонаучных областях познания [14, 15]. При этом сам g также может быть константой или уравнением любой сложности, но с обязательным условием, чтобы кроме единицы оно включало разные по знаку, математически и физически обоснованные, относительные (дольные) характеристики противоположно протекающих процессов: $\beta_{\text{ord}} \equiv 1/n \sum_i^n \beta_i$ – доля упорядоченных элементов и $\alpha_{\text{nord}} \equiv 1/n \sum_i^n \alpha_i$ – доля разупорядоченных элементов системы. В общем случае g может быть определен через β_{ord} и α_{nord} [15]:

$$g = 1 - \beta_{\text{ord}} + \alpha_{\text{nord}}, \quad (5)$$

или через статистические вероятности независимых случайных величин A и B , противоположных по знаку и действию событий:

$$g = 1 + \langle -\beta_{\text{ord}} + \alpha_{\text{nord}} \rangle = 1 + \langle -p'_i(B) + p'_i(A) \rangle, \quad (5a)$$

где $p'_i(B, A) = \langle -p'_i(B) + p'_i(A) \rangle$ – математическое ожидание событий B и A .

Статистическая (физическая) вероятность $p'_i(B) = \beta(B) = \frac{m}{n}$, и $p'_i(A) = \alpha(A) = \frac{k}{n}$ – доля фактически наблюдаемых с m и k по отношению к общему числу n событий B и A – является экспериментальной (физической) характеристикой и называемой частотностью $w \equiv \beta$ или α [29], в отличие от «математической» вероятности $p_i(B)$, $p_i(A)$ – доли случаев, благоприятствующих событиям B или A , в ее классическом определении. Статистическая вероятность может рассматриваться как дивергенция Кульбака–Лейблера [22].

В отсутствие диссоциации элементов системы, $g \rightarrow 1$, а $\alpha_{\text{nord}} = 0$, в случае ассоциации элементов системы, $g \rightarrow 2$, а $\beta_{\text{ord}} = 0$. GNF при сравнении экспериментальной и теоретической (полученной по классическому уравнению) зависимостей по заданным значениям переменных четко фиксирует любые отклонения от идеальности в исследуемой системе.

Физический смысл g как количественной относительной характеристики Φ^* (реальной) и Φ (идеальной) систем ($g = \Phi^*/\Phi$) виден, например, из рассмотрения уравнений состояния:

идеального газа

$$\Phi \Leftrightarrow PV = nRT;$$

реального газа

$$\Phi^* \Leftrightarrow P^*V = n^*RT = gnRT;$$

уравнений изохорно-изотермического процесса.

Здесь Φ и Φ^* – функции состояния; P и P^* – давление; n и n^* – количество молей соответственно идеального и реального газа; V, R, T – объем, универсальная газовая постоянная, абсолютная температура; $g = P^*V/PV = n^*/n$ – обобщенный фактор (коэффициент) неидеальности изобарно-изотермического процесса как функция относительной работы реального и идеального газа, а также относительного реального и идеального количества молей в системе, т. е. является или относительной энергетической, или относительной количественной (числовой) мерой рассматриваемой системы. Количество молей в системе может меняться в результате протекания реальных процессов межчастичного взаимодействия (ассоциация, кластеризация, т. е. мерой является суммарное количество упорядоченных и свободных элементов системы) и межчастичного отталкивания (диссоциация, распад, т. е. мера – суммарное количество распавшихся и не подвергнувшихся распаду элементов системы – коллигативные характеристики системы [14, 15]).

При вириальном разложении через молярную концентрацию c_m (число частиц) фактора неидеальности в ряд Камерлинг–Оннеса, вытекающего из уравнения состояния [14], вновь приходим к (5):

$$g_{th} = 1 + (-B_2 c_m) + B_3 c_m^2 + \dots \quad (56)$$

Знак (-) указывает на межчастичное притяжение, (+) – на отталкивание.

Чередование знаков в четных и нечетных термах вириального разложения доказано многочисленными экспериментами и компьютерными расчетами со второго и выше коэффициентов [23, 25]. В зависимости от условий (температура, концентрация, природа растворителя), в которых находится система, возможна полная компенсация (точки Кюри, Бойля, θ -условия) или превалирование состояния, связанное с четными или нечетными термами. Например, сжатие и набухание отдельных макромолекул или кластеров лигнина [6, 20].

Строго математически фактор g может быть определен через величины M – мера; R – размер; ε – масштаб; d – размерность в виде отношения $\ln M^*$ реального – M^* и $\ln M_0$ идеального состояний M_0 объекта:

$$g = \ln M^* / \ln M_0 = d/D, \quad (6)$$

где M^* и M_0 может быть N_d – число элементов в структуре фрактального реального (например, кластера) или математического (например, салфетка Серпинского) объекта и N_D – число элементов в структуре объекта в идеальном состоянии, обладающих свойством многомасштабности и самоподобия, с изменением R^* выполняется степенная зависимость

$$N_d(\varepsilon) = (R^*/r_0)^{-d} = \varepsilon^{-d},$$

а для этого же объекта в идеальном состоянии

$$N_D(\varepsilon) = (R_0/r_0)^{-D} = \varepsilon^{-D},$$

r_0 – размер элемента покрытия объекта; ε – масштаб.

Следовательно,

$$g(\varepsilon) = d \ln(N_d) / d \ln(N_D) = d/D. \quad (6a)$$

d и D – фрактальная и евклидова (в пространстве Минковского – топологическая) размерности.

Фрактальная хаусдорфова размерность по выбранной ε определяется как

$$d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln(N_d) / \ln(\varepsilon).$$

Формулы (6) и (6a) принципиально устанавливают связь между размерностями d , D и фактором g .

Из представленных выражений следует, что реальный (фрактальный) объект можно характеризовать мерой множества N_d элементов, покрывающих (заполняющих) этот объект, а идеальный объект – мерой множества N_D элементов.

Например, для вычисления g можно получить три результата (порядок, идеал, беспорядок) через выражение (6):

$$\text{ord} \rightarrow \{ 0 < g < 1, \text{ при } d < D;$$

$$\text{ideal} \rightarrow \{ g = 1, \text{ при } D = d;$$

$$\text{nonord} \rightarrow \{ 1 < g < 2, \text{ при } d > D.$$

GNF [15] может быть также определен отношением термодинамических функций, функционалов, параметров, количеством молей реального состояния вещества к идеальному. Фактор g можно получить и через энергетические характеристики [15], если представить полную энергию системы в виде суммы кинетической kT и потенциальной $U(r)$ энергий:

$$E_{\Sigma} = kT + U(r) = kT + 4\varepsilon \left(-\frac{\sigma}{r} \right)^6 + 4\varepsilon \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12}.$$

Нормируя по kT (эквивалент средней тепловой энергии – $\langle E \rangle$), имеем

$$g = 1 - \left[\frac{4\varepsilon}{kT} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 + \frac{4\varepsilon}{kT} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} \right],$$

где второй терм в выражении – потенциал Ленарда–Джонса [15].

Видно, что эти выражения и (5) согласованы, т. е.

$$\beta_{ord} = -\frac{4\varepsilon}{k_B T} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6, \text{ а } \alpha_{nord} = \frac{4\varepsilon}{k_B T} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12}.$$

Для энтропийно-мультифрактального анализа логично ввести энергетический (термодинамический, химический) фактор неидеальности g_{th} через свободную энергию, например как отношение изобарно-изотермических потенциалов $\Delta G_i^* / \Delta G_i$ реального и идеального состояний. $\Delta G_i^* = \mu_{i0}(p, T) - \mu_i(p, T, N_i)$ – изменение изобарного потенциала перехода i -го компонента из стандартного (начального) состояния в реальный раствор, $RT \ln a_i = -\Delta G_i^*$, а $RT \ln N_i = -\Delta G_i$ – изменение изобарного потенциала при переходе i -го компонента из стандартного состояния в идеальный раствор [14, 15], т. е.

$$g_{th} = \frac{\ln a_i}{\ln N_i}, \quad (7)$$

где $\mu_i^0(p, T)$ и $\mu_i(p, T, N_i)$ – химические потенциалы; $a = \gamma_i N_i$ – активность; γ_i – коэффициент активности i -го компонента системы,

$$\text{или } g_{th} = 1 + \left\langle \frac{\ln \gamma_i}{\ln N_i} \right\rangle.$$

Соотношения устанавливают функциональную связь между GNF, активностью и коэффициентом активности, при этом коэффициент активности может иметь значения как меньше 1 (упорядочение, ассоциация, кластеризация), так и больше 1 (диссоциация). Сравнивая выражения (7) и (5), принимаем допущение, что выражения математических ожиданий $\langle \frac{\ln \gamma_i}{\ln N_i} \rangle$ и $\langle -p_i(\beta) + p_i(\alpha) \rangle$ как дольные величины должны быть связаны с относительными функционалами энтропий системы S_{real}/S_{id} , т. е.

$$g_{(S)} \propto \pm S_{real}/S_{id},$$

отвечающими за ее реальное и идеальное поведение, следовательно,

$$g_{th} \equiv 1 - \langle \pm S_{real}/S_{id} \rangle.$$

Отсюда вытекает различие термодинамического g_{th} и энтропийного $g_{(S)}$ фактора:

$$g_{th} \equiv 1 + \langle \pm g_{(S)} \rangle. \quad (7a)$$

Из рассмотренных энтропий идеальному состоянию через $\langle \ln p_i \rangle$, безусловно, соответствует термодинамическая энтропия Больцмана $S_{id} \equiv S^B = -k_B \sum_{i=1}^N \ln p_i$, а через плотность вероятности $\langle p_i \ln p_i \rangle - S_{id} \equiv S^{B-G} = -k_B \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i$ либо информационная S^{G-H} . Все другие модельные представления энтропий (S^K , S^R , S^{Ts} и т. д.) будем считать как энтропии, ответственные за реальное состояние системы.

Далее, исходя из (7 – 7a) и модельных представлений энтропии Реньи Rn (2) и Тсаллиса Ts (1) путем замены в (2) параметра $\eta = 1 - q$ и в (1) ($\eta' = q - 1$ на новые параметры), $g_{th} = 1 + \langle \pm g_S \rangle$ и $g'_{th} = 1 + \langle \pm g_S \rangle$ получим новые уравнения энтропий, отличающиеся от энтропий Реньи и Тсаллиса тем, что формально выбираемый от $-\infty$ до $+\infty$ дробный или целочисленный момент порядка разбиения q заменен на дольный (0...1) момент порядка g_S – энтропийный фактор неидеальности систем – и g_{th} – термодинамический (теоретически изменяющийся в интервале 0...2, а практически от 0 до 3) фактор с ясным физическим смыслом, вытекающим из определений GNF. При этом из (4a) и (5), (7) следует:

$$g_S = q_\tau / q_{N(\varepsilon)}, \quad (7b)$$

где $q_\tau \equiv q$ – текущий дробный или целочисленный параметр преобразования (увеличения) меры, изменяющийся от 0 до $q_{N(\varepsilon)}$; $q_{N(\varepsilon)}$ – минимальное число квадратов, кубов с ε для покрытия всех элементов структуры.

Для евклидовой структуры с размерностью D (отсутствие ограничений на q_τ и $q_{N(\varepsilon)}$) при $\varepsilon \rightarrow 0$ в пределе $g_S = 1$. При таких условиях формализм Реньи и Тсаллиса полностью сохраняется и может быть использован с факторами неидеальности при изучении любых реальных систем, подчиняющихся экспоненциальным (в трактовке Реньи) и степенным (в трактовке Тсаллиса), включая структуры древесных культур.

В формализме Реньи:

$$S_{g_S}^{M-Rn}(p) = \frac{R}{1-g_S} \ln \sum_{i=1}^N p_i^{g_S}; \quad (8)$$

$$S_{g_{th}}^{M-Rn} = \frac{R}{g_{th}} \ln \left(\sum_{i=1}^N p_i^{g_{th}-1} \right). \quad (8a)$$

При $g_S = 1$ и $g_{th} = 0$ энтропии в (8) и (8а) переходят в энтропию Гиббса–Шеннона (S^{G-H}). Корреляционная энтропия (энтропия столкновений с p^2) в модели (8) согласно (7а) станет: при $q_\tau = g_S \cdot q_{N(\varepsilon)} = 2$, а в модели (8а) – при $q_\tau = (g_{th} - 1) \cdot q_{N(\varepsilon)} = 2$.

В формализме Тсаллиса:

$$S_{g_S}^{M-Ts}(p) = \frac{R(1 - \sum_i^{N(\varepsilon)} p_i^{g_S})}{g_S - 1}; \quad (9)$$

$$S_{g_{th}}^{M-Ts}(p) = \frac{R(1 - \sum_i^{N(\varepsilon)} p_i^{1-g_{th}})}{g_{th}}. \quad (9a)$$

Как ранее отмечено [3], энтропия Тсаллиса, и следовательно $S_{g_S}^{M-Ts}$ переходят в энтропию Реньи при $|1 - q| \ll 1$ и в энтропию $S_{g_S}^{M-Rn}$ при $|1 - g_S| \ll 1$.

Результаты исследования и их обсуждение

Новые модели энтропий (8а), (9а) с термодинамическим g_{th} и энтропийным g_S факторами неидеальности систем (рис. 3, 5) логически верно предсказывают изменение энтропии как функции вероятности p состояния системы, а именно: с упорядочением ($0 < g_{th} < 1$) энтропия уменьшается, а с ростом беспорядка ($1 < g_{th} \leq 2 \div 3$) – возрастает. Это выполнимо при условии (7а): $g_{th} = 1 + g_S$, которое легко проверяется соотношениями (6), (6а): $g_{th} = d/D$. При $d < D$ – упорядочение (например, для лигнина – сжатие макромолекулярного клубка в растворе), при $d > D$ – его набухание.

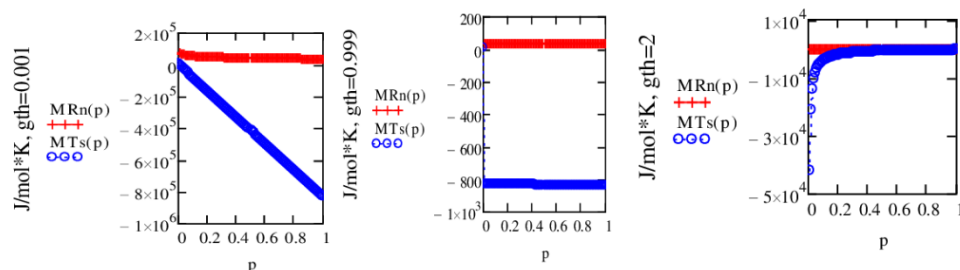


Рис. 5. Зависимость энтропий S^{M-Rn} и S^{M-Ts} от вероятности p (слева направо) при $g_S = 0$, $g_S \approx 1$ и $g_{th} = 2$

Fig. 5. Dependences of the entropies S^{M-Rn} and S^{M-Ts} on p (from left to right) for the entropic $g_S = 0$, $g_S \approx 1$ and thermodynamic $g_{th} = 2$ non-ideality factors of systems

Заметим, что при $0 < g_{th} < 1$ энтропийный фактор g_S будет со знаком (–), а при $1 < g_{th} \leq 2$ со знаком (+). Термодинамический фактор $0 < g_{th} \leq 2$ всегда положительный.

Предлагаемые модели энтропий (8)–(8а)–(9)–(9а) с новым параметром GNF (g_{th} и g_S) сохраняют принципиальные особенности оригиналов (1) и (2) с их достоинствами и недостатками. Рассматриваемые модели энтропий (S^{Rn} , S^{Ts} и вновь полученные S^{M-Rn} и S^{M-Ts}) для анализа сложных открытых (как квазиравновесных, так неравновесных систем) являются полуэмпирическими, следовательно, с различными приближениями. И тем не менее модели с факторами

g_{th} и g_s могут быть полезными при расчетах в энтропийно-фрактальном анализе сложных систем: в термодинамике экстенсивных систем «работает» – S^{M-Rn} , а неэкстенсивных – S^{M-Ts} . При этом в процессе обработки экспериментальных данных необходимо обращать внимание на то, что абсолютные величины расчетных значений энтропий зависят от назначаемых в моделях значений N и p , а для придания физического смысла энтропии требуется вводить размерную константу Больцмана k либо универсальную газовую постоянную R , как это принято в статистической термодинамике. Относительно лигнинов заметим, что фрактальность макромолекулярного кластера определяется комбинаторикой мономерных зеньев в пространстве, следовательно, энтропией.

В заключение для наглядности выборочно обратимся к некоторым обобщенным результатам исследований гидродинамических свойств растворов и топологической структуры лигнина [4], ограничившись экспериментальными фрактальными размерностями макромолекул лигнина, полученными А.П. Кармановым с сотрудниками [9], и дополним расчетами энтропии по моделям S^{M-Rn} и S^{M-Ts} .

В простейшем случае для линейных полимеров (имитационная модель случайных блужданий без самопересечений) при выполнении принципа гидродинамической эквивалентности в явлениях поступательного и вращательного трения макромолекул, т. е. при равенстве скейлинговых индексов $(1+a)/3 = 1 - c = |b| = \nu_F = d^{-1}$, проводят оценку самоподобной фрактальной размерности d , получаемой вязкостным, седиментационным и диффузионным методами [20]. При этом учитывается, что критический показатель Флори ν_F зависит от размерности пространства D : при $D < 4$ $\nu_F = 3/(d+2)$; при $D = 2$ $\nu_F = 0,749$; при $D = 3$ $\nu_F = 0,592$; при $D > 4$ $\nu_F = 1/2$. Топологическая размерность $d_t = 1$ [19, 20, 26, 27].

Выполнение принципа масштабной инвариантности, скейлингового вида зависимости плотности частиц в кластере от его размера и величины d на рассматриваемом топологическом уровне структурной организации лигнина [1, 2, 14, 15] в сочетании с теорией о фракталах и компьютерным моделированием [10, 11] позволили на современном уровне классифицировать лигнины разного ботанического вида не только по фрактальной размерности, но и по известным конформациям (линейные, гибко- и жесткоцепные, хаотически разветвленные, сшитые) [1, 2, 4, 9, 11, 26, 27]. Некоторые экспериментальные данные проверены математическими моделями роста фрактальных кластеров. С позиций критических фрактальных параметров, близкой моделью *bulk*-полимеризации монолигнолов с единичной математической вероятностью считается двух- и трехмерная кинетическая модель необратимого роста фрактальных кластеров Виттера–Сандера DLA P-CL (диффузионно-лимитированная агрегация частица–кластер) при броунском движении частиц [9]. Для описания реальных кластеров приемлема модель диффузионно-лимитированной агрегации кластер–кластер (DLA CL-CL), для которой статистической обработкой по числу частиц в кластере N установлена скейлинговая зависимость $N \sim R_g^d$, где R_g – радиус инерции кластера [9, 11, 26, 27].

В таблице представлены экспериментальные и расчетные фрактальные характеристики диоксанлигнинов (DL) хвойных и лиственных пород древесины, дополненные расчетными значениями факторов g_{th} , g_S с диапазонами энтропии по моделям S^{M-Rn} и S^{M-Ts} . Согласно (6), (6a), расчет g_{th} фактора проведен по выражению $g_{th} = d/D$, размерность – по $D = 3$, а g_S по (7a): $g_{th} = 1 + g_S$.

Расчетные фрактальные размерности d кластеров диоксанлигнина с трехмерной хаотически разветвленной структурой цепей по экспериментальным (вязкость, седиментация, диффузия) и компьютерным данным [9], а также факторы неидеальности g_{th} , g_S и энтропия в моделях S^{M-Rn} и S^{M-Ts}

Препарат лигнина	Древесная порода	Расчетные фрактальные размерности d кластеров DL по данным			d_{cp}	g_{th}	g_S	Энтропия*, Дж/моль·К (J/mol·K)	
		вискозиметрии $d = 3/(1+a)$	седиментации $d = 1/(1-c)$	диффузии $d = 1/ b $				S^{M-Rn}	S^{M-Ts}
ДЛ[9]	Сосна	2,42	2,86	2,86	2,50	0,83	-0,17	54,1...46,3	10,0...981,7
ДЛ [2]	Ель	2,68	–	2,54	2,61	0,87	-0,13	49,8...44,1	9,6...936,5
ДЛ[9]	Береза	1,91	2,20	1,75	1,68	0,56	-0,44	98,6...68,1	14,8...1455
Фрактальный кластер [9]	Компьют. моделирование с $L = 100$ узлов	2,56	2,56	2,56	2,56	0,85	-0,15	51,9...45,1	9,8...958,6

*Диапазон расчетных значений энтропии в интервале статистической вероятности $w \equiv p$ 0...1, совпадающей с диапазоном долевого (молярного) состава 0...1 в системе полимер–растворитель.

Расчетные значения энтропий S^{M-Rn} и S^{M-Ts} полимеров в растворах могут быть использованы совместно с экспериментальными или расчетными значениями энтальпий ΔH этих же полимеров в растворах для дальнейших расчетов свободных энергий Гиббса $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. Заметим, что по экспериментальным данным [4] для конкретных, представленных в таблице образцов ДЛ в системе лигнин–растворитель (диоксан), в стандартных условиях ($T = 298$ К) знак расчетных величин свободной энергии смешения $\Delta G_m < 0$ будет определяться преимущественно именно энтропийной составляющей $T\Delta S$, что явно указывает на самопроизвольность растворения лигнина в диоксане.

Предлагаемый в настоящей работе алгоритм расчетов энтропийного и термодинамического факторов неидеальности и энтропии сложных систем может быть дополнен рассмотрением термодинамической теории реальных растворов лигнинов как природных объектов высокомолекулярных соединений с применением энтропийно-мультифрактального подхода с фактором неидеальности систем к изучению топологических свойств лигнинов и лигносульфонатов в растворах гидродинамическими методами, а также к изучению термодинамики растворов полимеров как природных, так и синтетических полимеров.

Выводы

1. Получены новые уравнения информационных и термодинамических энтропий с фактором неидеальности реальных систем для анализа любых самоорганизованных квазиравновесных структур (в формализме Реньи) и существенно неравновесных структур (в формализме Тсаллиса) при описании коллективного поведения сложных динамических систем, к которым относятся и растворы высокомолекулярных соединений, включая лигнины как основные компоненты растительного мира.

2. Предложен новый алгоритм расчетов энтропийного и термодинамического факторов неидеальности сложных систем, рассмотрены некоторые аспекты термодинамической теории реальных растворов лигнинов как природных объектов.

3. Продемонстрированы возможности использования энтропийно-мультифрактального подхода к изучению термодинамических свойств растворов лигнинов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Афанасьев Н.И.* Структура макромолекул в растворах, на границах раздела фаз и поверхностно-активные свойства лигносульфонатов: дис. ... д-ра. хим. наук. СПб.: ЛТА, 1996. 302 с. [Afanas'yev N.I. *Structure of Macromolecules in Solutions and at the Phase Boundaries, the Surface-Active Properties of Lignosulfonates*: Dr. Chem. Sci. Diss. Saint Petersburg, LTA Publ., 1996. 302 p.]

2. *Афанасьев Н.И., Коробова Е.Н., Ферофонтова С.Д.* Межмолекулярные взаимодействия в растворах лигносульфонатов // Изв. вузов. Лесн. журн. 1996, № 1-2. С. 110–117. [Afanas'yev N.I., Korobova E.N., Ferofontova S.D. Intermolecular Interactions in Solutions of Lignosulfonates. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1996, no. 1-2, pp. 110–117]. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c80/142_148.pdf

3. *Башикиров А.Г.* Энтропия Реньи как статистическая энтропия для сложных систем // ТМФ. 2006. Т. 149, № 2. С. 299–317. [Bashkirov A.G. Renyi Entropy as a Statistical Entropy for Complex Systems. *Teoreticheskaya i Matematicheskaya Fizika* [Theoretical and Mathematical Physics], 2006, vol. 149, no. 2, pp. 299–317]. DOI: [10.4213/tmf4235](https://doi.org/10.4213/tmf4235)

4. *Боголицын К.Г., Лунин В.В., Косяков Д.С., Карманов А.П., Скребец Т.Э.* и др. Физическая химия лигнина. М.: Академкнига, 2010. 492 с. [Bogolitsyn K.G., Lunin V.V., Kosyakov D.S., Karmanov A.P., Skrebets T.E. et al. *Physical Chemistry of Lignin*. Moscow, Akademkniga Publ., 2010. 492 p.]

5. *Бриллюэн Л.* Научная неопределенность и информация. М.: Мир, 1966. 272 с. [Brillouin L. *Scientific Uncertainty and Information*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1966. 272 p.]. DOI: [10.1016/C2013-0-12512-3](https://doi.org/10.1016/C2013-0-12512-3)

6. *Будтов В.П.* Физическая химия растворов полимеров. СПб.: Химия, 1992. 384 с. [Budtov V.P. *Physical Chemistry of Polymer Solutions*. Saint Petersburg, Khimiya Publ., 1992. 384 p.]

7. *Зарипов Р.Г.* Информация различия и переходы беспорядок–порядок. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. 155 с. [Zaripov R.G. *Discrimination Information and Disorder – Order Transitions*. Kazan, KSTU Publ., 1999. 155 p.]

8. *Зубарев Д.Н., Морозов В.Г., Пенке Г.* Статистическая механика неравновесных процессов. М.: Физматлит, 2002. 432 с. [Zubarev D.N., Morozov V.G., Repke G. *Statistical Mechanics of Nonequilibrium Processes*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 432 p.]

9. *Карманов А.П.* Самоорганизация и структурная организация лигнина. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 270 с. [Karmanov A.P. *Self-Organization and Structural Organization of Lignin*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2004. 270 p.]

10. Карманов А.П., Матвеев Д.В., Монаков Ю.Б. Динамика полимерных мономерных предшественников гваяцильных лигнинов // Докл. АН. 2001. Т. 380, № 5. С. 635–638. [Karmanov A.P., Matveyev D.V., Monakov Yu.B. The Dynamic of the Polymerization of Monomeric Precursors of Guaiacyl Lignins. *Doklady Akademii Nauk*, 2001, vol. 380, no. 5, pp. 635–638].
11. Карманов А.П., Кузьмин Д.В., Шамина И.Н., Беляев В.Ю., Кочева Л.С., Матвеев Д.В., Монаков Ю.Б. Исследование гидродинамических и конформационных свойств лигнинов из древесных растений *Sorbus aucuparia* и *Robinia pseudoacacia* // Высокмолекулярные соединения. Сер. А: Физика полимеров. 2004. Т. 46, № 6. С. 997–1004. [Karmanov A.P., Kuz'min D.V., Shamshina I.N., Belyaev V.Yu., Kocheva L.S., Matveyev D.V., Monakov Yu.B. Hydrodynamic and Conformational Properties of Lignins from *Sorbus aucuparia* and *Robinia pseudoacacia* Woody Plants. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya A: Fizika polimerov* [Polymer Science. Series A - Polymer Physics], 2004, vol. 46, no. 6, pp. 997–1004].
12. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 1. М.: Янус, 1995. 624 с. [Klimontovich Yu.L. *Statistical Theory of Open Systems*. Vol. 1. Moscow, Yanus Publ., 1995. 624 p.].
13. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 632 с. [Kolesnichenko A.V., Marov M.Ya. *Turbulence and Self-Organization. Problems of Modeling Space and Natural Environments*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2014. 632 p.].
14. Макаревич Н.А. Фактор неидеальности в классических уравнениях для реальных газов и конденсированных систем: универсальный ассоциативно-ионизационный множитель в классических уравнениях для растворов неэлектролитов и электролитов // Докл. АН Беларуси. 2016. Т. 60, № 1. С. 94–101. [Makarevich N.A. Non-Ideality Factor in the Classical Equations for Real Gases and Condensed Systems: Universal Associative-Ionized Multiplier in the Classical Equations for Solutions of Nonelectrolytes and Electrolytes. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi* [The Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2016, vol. 60, no. 1, pp. 94–101].
15. Макаревич Н.А. Межфазная граница «газ–жидкость–твердое тело»: моногр. Архангельск: САФУ, 2018. 411 с. [Makarevich N.A. *Interface "Gas–Liquid–Solid"*: Monograph. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2018. 411 p.].
16. Полак Л.С., Михайлов А.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических процессах. М.: Наука, 1975. 351 с. [Polak L.S., Mikhaylov A.S. *Self-Organization in Nonequilibrium Physical and Chemical Processes*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 351 p.].
17. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с. [Prigogine I., Kondepudi D. *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*. Translated from English. Moscow. Mir Publ., 2002. 461 p.].
18. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с. [Feder J. *Fractals*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1991. 254 p.]. DOI: [10.1007/978-1-4899-2124-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6)
19. Цветков В.Н., Лавренко П.Н., Бушин С.В. Гидродинамический инвариант полимерных молекул // Успехи химии. 1982. Т. 51, № 10. С. 1698–1732. [Tsvetkov V.N., Lavrenko P.N., Bushin S.V. A Hydrodynamic Invariant of Polymer Molecules. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 1982, vol. 51, no. 10, pp. 1698–1732]. DOI: [10.1070/RC1982v051n10ABEH002935](https://doi.org/10.1070/RC1982v051n10ABEH002935)
20. Цветков В.Н., Эскин В.Е., Френкель С.Я. Структура макромолекул в растворах. М.: Наука, 1964. 720 с. [Tsvetkov V.N., Eskin V.E., Frenkel' S.Ya. *Structure of Macromolecules in Solutions*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 720 p.].
21. BBI JU Strengthens Collaboration on Sustainable Bioeconomy with the European Forest Institute. *Materials of the Bio-Based Industries Joint Undertaking Website*. 2020.

Available at: <https://www.bbi.europa.eu/news/bbi-ju-strengthens-collaboration-sustainable-bioeconomy-european-forest-institute> (accessed 23.12.19).

22. Cohen E.G.D. Superstatistics. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2004, vol. 193, iss. 1-4, pp. 35–52. DOI: [10.1016/j.physd.2004.01.007](https://doi.org/10.1016/j.physd.2004.01.007)

23. Efimova E.A., Ivanov A.O., Camp P.J. Thermodynamic Properties of Ferrofluids in Applied Magnetic Fields. *Physical Review E*, 2013, vol. 88, iss. 4, art. 042310. DOI: [10.1103/PhysRevE.88.042310](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.042310)

24. Jaynes E.T. Information Theory and Statistical Mechanics. *Brandeis University Summer Institute Lectures in Theoretical Physics*. Vol. 3 – Statistical Physics. New York, W.A. Benjamin Inc., 1963, pp. 181–218.

25. Joslin C., Goldman S. The Third Dielectric and Pressure Virial Coefficients of Dipolar Hard Sphere Fluids: II. Numerical Results. *Molecular Physics*, 1993, vol. 79, iss. 3, pp. 499–514. DOI: [10.1080/00268979300101401](https://doi.org/10.1080/00268979300101401)

26. Karmanov A.P., Monakov Yu.B. Hydrodynamic Properties and Structure of Lignin. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2000, vol. 48, iss. 2, pp. 151–175. DOI: [10.1080/00914030008050614](https://doi.org/10.1080/00914030008050614)

27. Karmanov A.P., Poleschikov S.M., Kocheva L.S. Theoretical and Experimental Simulation of Lignin Biosynthesis. *Butlerovskiye soobshcheniya [Butlerov Communications]*, 2015, vol. 41, no. 3, pp. 147–151. DOI: [10.37952/ROI-jbc-01/15-41-3-147](https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/15-41-3-147)

28. Kullback S., Leibler R.A. On Information and Sufficiency. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1951, vol. 22, iss. 1, pp. 79–86. DOI: [10.1214/aoms/1177729694](https://doi.org/10.1214/aoms/1177729694)

29. Maher P. Explication of Inductive Probability. *Journal of Philosophical Logic*, 2010, vol. 39, iss. 6, pp. 593–616. DOI: [10.1007/s10992-010-9144-4](https://doi.org/10.1007/s10992-010-9144-4)

30. Naimark O.B. Defect-Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure in Multifield Continua. *Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure*. Ed. by G. Capriz, P. Mariano. Boston, MA, Birkhäuser, 2004, pp. 75–114. DOI: [10.1007/978-0-8176-8158-6_4](https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8158-6_4)

31. Pavlos G.P. Complexity Theory, Time Series Analysis and Tsallis q -Entropy Principle Part One: Theoretical Aspects. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2017, vol. 26, no. 5-6, pp. 139–180. DOI: [10.1515/jmbm-2017-0023](https://doi.org/10.1515/jmbm-2017-0023)

32. Rényi A. *Probability Theory*. North-Holland, Amsterdam, 1970. 670 p.

33. Szilard L. Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen. *Zeitschrift für Physik*, 1929, vol. 53, iss. 11-12, pp. 840–856. DOI: [10.1007/BF01341281](https://doi.org/10.1007/BF01341281)

34. Tsallis C. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics. *Journal of Statistical Physics*, 1988, vol. 52, pp. 479–487. DOI: [10.1007/BF01016429](https://doi.org/10.1007/BF01016429)

35. Wohlgenuth R., Twardowski T., Aguilar A. Bioeconomy Moving forward Step by Step – A Global Journey. *New Biotechnology*, 2021, vol. 61, pp. 22–28. DOI: [10.1016/j.nbt.2020.11.006](https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.006)

NON-IDEALITY FACTOR IN MULTIFRACTAL AND ENTROPY-BASED ANALYSIS OF SELF-ORGANIZED STRUCTURES OF PLANT POLYMERS (LIGNINS)

Nikolay A. Makarevich^{1,2}, Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: [ABF-6367-2020](https://orcid.org/0000-0002-9595-0345), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9595-0345>

¹Military Academy of the Republic of Belarus, prosp. Nezavisimosti, 220, Minsk, 220000, Republic of Belarus; e-mail: nikma@tut.by

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

Abstract. An attempt has been made to introduce the generalized non-ideality factor of systems g (GNF) into information entropy equations that describe self-organized structures

of essentially nonequilibrium systems with the use of studying the topological properties of high molecular weight compounds in solutions using wood lignins as an example. The factor g as a relative thermodynamic characteristic connects the ideal and real models of systems in which two competitive (opposite in sign and action) processes can be distinguished: order (–) ↔ chaos (+); attraction (–) ↔ repulsion (+); compression (–) ↔ extension (+); clustering (–) ↔ decay (+), etc. $g = 1 + \langle -\beta_{ord} + \alpha_{nord} \rangle = 1 + \langle -p_i(\beta) + p_i(\alpha) \rangle$, where $-\beta_{ord} \equiv 1/n \sum_i^n \beta_i$ and $\alpha_{nord} \equiv 1/n \sum_i^n \alpha_i$ are relative average characteristics (p_i – probabilities) of oppositely occurring processes. The factor g varies in the interval $0 \leq g \leq 1$ and depends on which of the competitive processes prevails. For $\alpha_{nord} = 0$ $g \rightarrow 0$, for $\beta_{ord} = 0$ $g \rightarrow 2$, for $g = 1$ the behavior of the elements of the system will be ideal. The factor g is introduced into any classical equations suitable for studying ideal systems with the aim of using them to describe real systems (for example, the equations of Henry, Raoult, Van't Hoff, general gas, etc.). Strictly mathematically, the factor g is defined through the values M – measure, ε – size (scale), and d – dimension as a ratio of logarithms of measures of real (M^*) and ideal (M_0) states of the object: $g_{th} = \ln M^* / \ln M_0 = d/D$, where M^* and M_0 can be the number of elements in the structure of the fractal real (for example, cluster) or mathematical object (for example, Sierpiński triangle) N_d and the number of elements in the structure of the object in the perfect condition, having the property of multi-scale and self-similarity, N_D , where d and D are the fractal and Euclidean dimensions. As a thermodynamic characteristic g_{th} is defined by the ratio of thermodynamic functions, functionals, for example, $\Delta G_i^* / \Delta G_i$, where $\Delta G_i^* = -RT \ln a_i$ is real and, $\Delta G_i = -RT \ln a_i$ is ideal state; the number of moles of n^* – real state of matter to n – ideal state of matter; relative entropies of the system $\Delta S_{real} / \Delta S_{id}$ (ΔS_{id} – Boltzmann entropy). New expressions of the information and thermodynamic entropies with a fractional ($0 \div 1$) moment of order and with the entropic g_S and g_{th} non-ideality factors are obtained for the analysis of self-organized quasi-equilibrium structures in the Renyi formalism $S_{g_S}^{M-Rn}(p) = \frac{R}{1-g_S} \ln \sum_i^N p_i^{g_S}$, $S_{g_{th}}^{M-Rn} = \frac{R}{g_{th}} \ln \left(\sum_{i=1}^N p_i^{g_{th}-1} \right)$; in the Tsallis formalism $S_{g_S}^{M-Ts}(p) = \frac{R(1-\sum_i^{N(\varepsilon)} p_i^{g_S})}{g_S-1}$, $S_{g_{th}}^{M-Ts}(p) = \frac{R(1-\sum_i^{N(\varepsilon)} p_i^{1-g_{th}})}{g_{th}}$ with an application for studying the topological properties of high-molecular compounds by hydrodynamic methods, as well as the thermodynamics of polymer solutions.

For citation: Makarevich N.A. Non-Ideality Factor in Multifractal and Entropy-Based Analysis of Self-Organized Structures of Plant Polymers (Lignins). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 194–212. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-194-212

Keywords: non-ideality factor of systems, fractal structures, fractal dimensionality, information and thermodynamic entropy, polymer solutions, thermodynamics of polymer solutions, lignins.

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
The author declare that there is no conflict of interest*

Поступила 23.12.19 / Received on December 23, 2019



УДК 68.47.75

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-213-222

ПОКАЗАТЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ОХРАНЫ ЛЕСОВ ОТ ПОЖАРОВ

Р.В. Котельников¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [B-2453-2018](https://orcid.org/0000-0002-9984-5913),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5913>

А.А. Мартынюк², д-р с.-х. наук, чл.-кор. РАН; ResearcherID: [AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

¹Центр лесной пирологии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизводства лесов (филиал ФБУ ВНИИЛМ), ул. Крупской, д. 42, г. Красноярск, Россия, 660062; e-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; e-mail: vniilm_martinuk@mail.ru

Аннотация. В статье проанализированы основные показатели, применяемые для оценки эффективности организации охраны лесов Российской Федерации от пожаров. Обоснована необходимость совершенствования подходов к такой оценке. На основе экспертного анализа различных ситуаций и производственных показателей – практики работы подразделений авиационной охраны лесов и региональных диспетчерских служб – можно сделать вывод, что все факторы, влияющие на эффективность работы, необходимо условно разделить на две группы: организационные и погодные. При этом первые из названных в конечном счете влияют на площадь территории, пройденной огнем. Вторые невозможно контролировать – их влияние необходимо исключить при расчете показателей эффективности. Таким образом, все показатели, характеризующие погодный фактор, прямо или косвенно взаимосвязаны. В статье обоснована целесообразность использования показателя напряженности пожароопасного сезона для учета погодных факторов. Для оценки эффективности предлагается рассчитывать относительное отклонение значений горимости и напряженности лесов от среднеголетних. Приводится формула, алгоритм, а также ряд рекомендаций по автоматизации расчета. Разработана вербально-числовая шкала условной оценки эффективности деятельности лесопожарных формирований. Приведена интерпретация значений условного показателя эффективности деятельности лесопожарных формирований для выбранной шкалы. На основе предложенного метода проведен анализ оценки эффективности организации охраны лесов от пожаров в 2019 г. для всех субъектов Российской Федерации. При разработке подхода были приняты во внимание существующие требования к учету лесных пожаров, затраты на их тушение, а также особенности системы учета объемов финансирования мероприятий, связанных с охраной лесов от пожаров, поэтому предлагаемый подход является оптимальным для оценки деятельности лесопожарных служб, так как учитывает предыдущий опыт работы в различных метеорологических условиях. Данная разработка может быть использована в системах поддержки принятия управленческих решений в области охраны лесов от пожаров, что позволит существенно повысить эффективность управленческих решений в лесной сфере.

Для цитирования: Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Показатель для оценки эффективности организации охраны лесов от пожаров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 213–222. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-213-222

Ключевые слова: напряженность пожароопасного сезона, охрана лесов от пожаров, оценка эффективности.

Проблема лесных пожаров в условиях глобальных изменений климата [21] становится все более актуальной [16, 17].

В соответствии с Лесным кодексом Российской Федерации полномочия по осуществлению на землях лесного фонда охранных мероприятий (в том числе осуществление мер пожарной безопасности и тушения лесных пожаров) переданы субъектам Российской Федерации. Несмотря на введенные в 2019 году нормативы оснащения регионов лесопожарной техникой и инвентарем и наличие нормативов противопожарного обустройства лесов, регионам предоставлена существенная свобода в формировании системы охраны лесов от пожаров, определении зон контроля лесных пожаров, выборе способов и методов тушения. Эффективность деятельности органов государственной власти субъектов Российской Федерации в этой сфере определяется по конечному результату: минимизации вреда, причиненного пожарами лесам и объектам инфраструктуры, и затрат на реализацию соответствующих мер [1, 2, 4, 5].

Получить численную оценку данных показателей, тем более установить критерий эффективности работы не представляется возможным. В связи с этим, в соответствии с утвержденной методикой [11], применяется рейтинговый метод оценки. Показателями (критериями) [10], характеризующими организацию обеспечения охраны лесов от пожаров, являются:

- удельная площадь погибших от пожаров земель лесного фонда;
- соотношение средней площади 1 лесного пожара текущего года и средней площади 1 лесного пожара за последние 5 лет;
- доля крупных пожаров в общем количестве возникших лесных пожаров, %;
- доля лесных пожаров, ликвидированных в течение первых суток с момента обнаружения, в общем количестве ликвидированных пожаров, %.

Эти показатели связаны не только с качеством организации и обеспечения охраны лесов от пожаров [4, 14], но и с большим количеством других факторов, в первую очередь погодных.

Кроме того, последние три из названных выше показателей напрямую влияют на первый, т. е. они зависят друг от друга. Несомненно, что данные показатели являются избыточными и их использование негативно влияет на систему учета лесных пожаров, стимулируя их дробление.

Также нужно помнить, что не во всех случаях оперативность тушения положительно сказывается на оптимальности затрат. В некоторых случаях одна группа пожарных, даже доставленная к месту пожара только на второй день, может, воспользовавшись снижением интенсивности горения, вызванным низкими температурами, ликвидировать лесной пожар на третий день. При этом нерентабельно ради показателя «в первые сутки» затрачивать избыточные ресурсы. То есть наличие «технологических» показателей не всегда положительно влияет на экономическую эффективность организации работ. Следовательно,

но, имеется необходимость выработки новых подходов к оценке организации и обеспечения охраны лесов от пожаров.

Сохраняя общую концепцию необходимости оценки обобщенной эффективности по косвенным показателям, предлагается частично исключить влияние факторов, на которые лесопожарные подразделения по объективным причинам не могут повлиять.

На основе экспертного анализа различных ситуаций и производственных показателей – практики работы в сфере пожаротушения – можно сделать вывод, что факторы, влияющие на эффективность работы, условно делятся на две группы: организационные и погодные. Все организационные факторы в конечном счете влияют на размер площади, пройденной огнем, вред, нанесенный пожаром и на объем финансовых затрат на тушение. Средства, выделенные на обеспечение охраны лесов от пожаров, тоже относятся к организационным факторам и влияют на пройденную огнем площадь, размер ущерба и затраты.

Учитывая, что финансирование мероприятий осуществляется из разных источников (не на все из них регионы могут оказать влияние), а также, что вложенные средства иногда могут принести реальную пользу только по прошествии нескольких лет (или приносить ее в течение протяженного по времени периода), не представляется возможным оценить влияние денежных вложений на показатели эффективности организации охраны лесов от пожаров в конкретный год.

Экономическая составляющая – предмет дальнейших исследований – в рамках предлагаемого подхода не учитывается.

При этом вред, причиненный лесам, а также затраты на тушение напрямую связаны с размером площадей, пройденных огнем. Численная взаимосвязь здесь сильно варьируется, но, как будет показано ниже, при относительной оценке динамики показателей достаточно использовать один из них.

Наиболее точным из трех названных показателей является оценка вреда, причиненного лесам. Однако его детальный расчет длителен и трудоемок, к тому же пока не утверждена соответствующая методика. Кроме того, отсутствие ретроспективных данных, которые необходимы при использовании предлагаемого подхода, приводит к тому, что размер площади, пройденной огнем, становится наиболее подходящим показателем для учета организационных факторов. Сейчас источник официальных данных об этом критерии – региональные диспетчерские службы, но в перспективе для получения таких сведений целесообразно использовать информацию со спутниковых снимков [8].

Погодные факторы, в отличие от экономической составляющей, не поддаются контролю и исключаются при расчете эффективности. Все их характеристики прямо или косвенно взаимосвязаны и распределение этих показателей далеко от нормального, в связи с чем построение классической матрицы взаимосвязи математически не обосновано. Однако, с точки зрения поставленной задачи, достаточно принять допущение об условно остающейся постоянной взаимосвязи между показателями, тогда для сравнительной (относительно среднемноголетних данных) оценки влияния погоды на горимость лесов можно будет взять один из показателей.

Большинство существующих показателей, характеризующих влияние погоды на горимость лесов [13, 18, 20], считаются по накопительному принципу

и зависят от суточных значений метеопараметров. Примером здесь может являться официально утвержденный комплексный показатель природной пожарной опасности в зависимости от условий погоды [12]. Попытка математически усреднить эти значения для получения характеристики года в целом в большинстве случаев приводит к «средней температуре по больнице».

Учесть все факторы напрямую невозможно, но погодные косвенно характеризует напряженность пожароопасного сезона (число дней с классом пожарной опасности по условиям погоды III и выше, поделенное на количество дней в пожароопасном сезоне). Но так как физический смысл отмеченных групп показателей принципиально разный, то подход к их оценке тоже должен быть разный.

Результат влияния организационных факторов отражается в пройденной огнем площади. Вместе с тем целесообразно учитывать не абсолютное значение горимости, а его отклонение от среднееголетнего. Аналогично погодные условия рекомендуется оценивать не по самой напряженности пожароопасного сезона, а по ее отклонению от среднего многолетнего значения. Таким образом, целесообразно принять следующие условные тезисы, перечисленные в табл. 1.

Таблица 1

Обоснование граничных значений критерия

Напряженность пожароопасного сезона H'	Горимость S'	Условное описание ситуации	Вывод (оценка работы)
Максимальная (+1)	Максимальная (+1)	Пожароопасный сезон сложный и горимость очень высокая (т. е. не связанная с «промахами» в работе)	Удовлетворительная (0)
Минимальная (0)	Минимальная (0)	Пожароопасный сезон несложный, соответственно и горимость очень низкая (т. е. не связанная с хорошей работой)	Удовлетворительная (0)
Минимальная (0)	Максимальная (+1)	Пожароопасный сезон несложный, а горимость очень высокая (т. е. связана с ошибками при организации тушения)	Негативная (-1)
Максимальная (+1)	Минимальная (0)	Пожароопасный сезон очень тяжелый, а горимость на низком уровне (т. е. работа организована эффективно)	Положительная (+1)

Для того чтобы представить результат в удобном виде («0», «-1» или «+1») целесообразно между факторами напряженности и горимости поставить

минус: $(+1) - (+1) = 0$; $(0) - (0) = 0$; $(0) - (+1) = -1$; $(+1) - (0) = +1$, т. е. необходимо из фактора напряженности пожароопасного сезона вычесть фактор горимости.

Аналогично, чтобы привести значения каждого фактора в нужную шкалу («-1» – минимальное значение, «+1» – максимальное значение), необходимо разницу анализируемого и минимального значений разделить на разницу максимального и минимального значений:

$$H' = \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \begin{cases} = 1, & \text{при } H = H_{\max}; \\ = 0, & \text{при } H = H_{\min}, \end{cases}$$

где H, H_{\min}, H_{\max} – соответственно текущее, минимальное и максимальное значения напряженности пожароопасного сезона по субъекту Российской Федерации за последние 10 лет, %.

Аналогично можно выразить условный показатель влияния фактора горимости.

Таким образом, для обеспечения масштабирования показателей в интуитивно понятную шкалу итоговую взаимосвязь можно выразить уравнением

$$e = \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} - \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}},$$

где e – условный показатель эффективности деятельности лесопожарных формирований; S, S_{\min}, S_{\max} – соответственно текущее, минимальное и максимальное значения площади, пройденной огнем за последние 10 лет, га.

При расчете напряженности по субъекту Российской Федерации важно учитывать, что данные по классу пожарной опасности формируются на метеостанциях. Для большей точности агрегированного (по субъекту Российской Федерации) расчета целесообразно учитывать весовые коэффициенты метеостанций. В этом случае формула расчета напряженности пожароопасного сезона H примет следующий вид:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i k_i)}{\sum_{i=1}^n k_i},$$

где n – количество метеостанций, зона действия которых попадает на территорию субъекта Российской Федерации; i – порядковый номер метеостанции, зона действия которой включает территорию субъекта Российской Федерации (может быть и рядом с границей в другом регионе); H_i – напряженность пожароопасного сезона, рассчитанная по классу пожарной опасности на метеостанции i ,

$$H_i = \frac{N_{\text{III-V}}}{N},$$

$N_{\text{III-V}}$ – число дней с классом пожарной опасности III и выше; N – число дней в пожароопасном сезоне; k_i – весовой коэффициент метеостанции (доля площади зоны действия метеостанций, попадающей на территорию субъекта Российской Федерации).

При расчете средних и граничных значений берутся данные за 10 лет, включая текущий (за который рассчитывается коэффициент).

Полученный показатель эффективности деятельности лесопожарных формирований будет всегда в диапазоне от -1 до +1.

Для удобства восприятия рекомендуется использовать вербально-числовую шкалу (табл. 2).

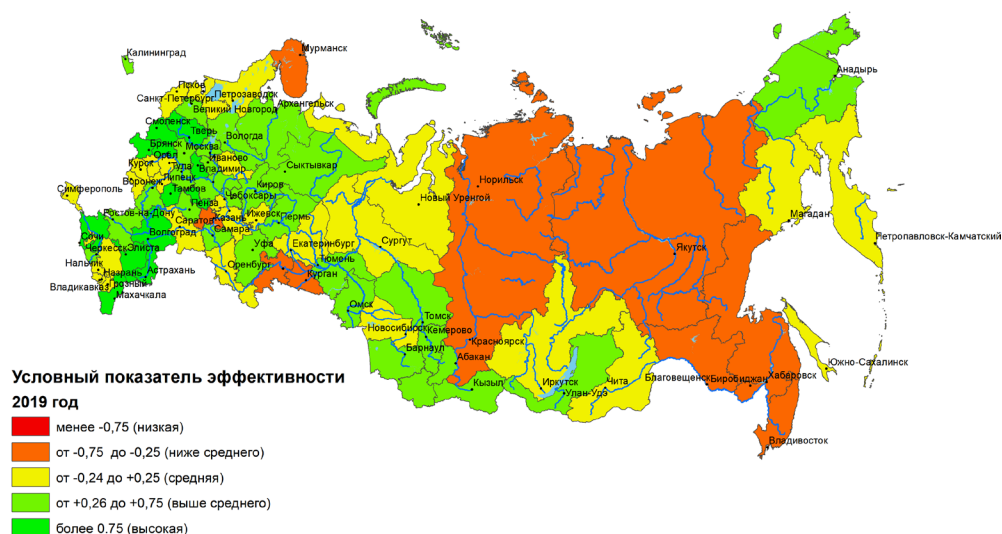
Таблица 2

Вербально-числовая шкала условной оценки эффективности деятельности лесопожарных формирований

Интервал значений условного показателя эффективности деятельности лесопожарных формирований	Интерпретация значений (оценка работы)
От -1 до -0,75	Низкая
От -0,74 до -0,25	Ниже средней
От -0,24 до 0,25	Средняя
От 0,26 до 0,75	Выше средней
От 0,76 до 1	Высокая

Несмотря на то, что предлагаемый показатель не учитывает всех факторов, влияющих на эффективность деятельности лесопожарных формирований, он может использоваться для приближенной оценки.

В качестве апробации метода был произведен расчет условного показателя эффективности по данным за 2019 г. (см. рисунок).



Предварительная оценка эффективности работ лесопожарных подразделений по предлагаемому комплексному показателю

Preliminary assessment of the effectiveness of forest firefighting units by the proposed composite indicator

Результат примерно соответствует данным, содержащимся в публикациях в средствах массовой информации, и экспертной оценке деятельности лесопожарных формирований, которая была дана специалистами Федеральной диспетчерской службы ФБУ «Авиалесоохрана».

В рамках существующих требований к учету лесных пожаров, к затратам на их тушение и имеющейся системы учета объемов финансирования мероприятий, связанных с охраной лесов от пожаров, предлагаемый подход является оптимальным для оценки деятельности лесопожарных служб, так как он использует доступные данные и учитывает предыдущий опыт работы в различных метеорологических условиях.

Вместе с тем дальнейшая цифровизация отрасли, в частности формирование информационных баз данных с детализированными многолетними сведениями об объемах и стоимости проведенных мероприятий, позволит в перспективе учитывать и распределенное по времени влияние финансовой составляющей.

Предложенный показатель может быть использован в Информационной системе поддержки управленческих решений в области охраны лесов от пожаров. Подобные системы уже существуют в ряде стран [15, 19]. В России основой для нее может стать Информационная система дистанционного мониторинга (ИСДМ-Рослесхоз) [3, 6, 7, 9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Волокитина А.В., Софронова Т.М. Оптимизация затрат при тушении лесных пожаров // Лесхоз. информ., 2018, № 2. С. 54–64. [Volokitina A., Sofronova T. Optimization of Forest Fire Fighting Expenditures. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2018, no. 2, pp. 54–64]. DOI: [10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.06](https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.06)
2. Главацкий Г.Д., Груманс В.М. Проблема оптимизации и экономической эффективности лесопожарных мероприятий при тушении крупных лесных пожаров // Лесн. вестн. 2001. № 2. С. 33–45. [Glavatskiy G.D., Grumans V.M. The Problem of Optimization and Economic Efficiency of Forest Fire Measures in Extinguishing Large Forest Fires. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2001, no. 2, pp. 33–45].
3. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства. Режим доступа: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 09.02.20). [*Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry*].
4. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с. [Korovin G.N., Andreyev N.A. *Aviation Protection of Forests*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 223 p.].
5. Коровин Г.Н., Абрамов Л.М., Левина Г.Г. Экономико-математическое моделирование авиалесоохраны. Л.: ЛенНИИЛХ, 1982. 57 с. [Korovin G.N., Abramov L.M., Levina G.G. *Economic and Mathematical Modeling of Aviation Security*. Leningrad, LenNIIKH Publ., 1982. 57 p.].
6. Котельников Р.В., Коришунув Н.А., Гиряев Н.М. Задачи принятия решений в области охраны лесов от пожаров: основные приоритеты развития информационного обеспечения // Сиб. лесн. журн. 2017. № 5. С. 18–24. [Kotelnikov R.V., Korshunov N.A., Giryayev N.M. Objectives of Decision Making in Protecting Forests from Fires. Main Priorities on Development of Informational Support. *Sibirskij Lesnoj Zurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2017, no. 5, pp. 18–24]. DOI: [10.15372/SJFS20170502](https://doi.org/10.15372/SJFS20170502)
7. Котельников Р.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Ершов Д.В. Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз // Лесоведение. 2019. № 5. С. 399–409. [Kotelnikov R.V., Lupyan E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V. Space Monitoring of Forest Fires: History of Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz.

Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 5, pp. 399–409]. DOI: [10.1134/S0024114819050048](https://doi.org/10.1134/S0024114819050048)

8. Лупян Е.А., Барталев С.А., Ершов Д.В., Стыценко Ф.В. Методика оценки площадей, пройденных лесными пожарами, на основе данных спутниковых наблюдений // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: докл. VI Всерос. конф. (Москва 20–22 апреля 2016 г.)*. М.: ЦЭПЛИ РАН, 2016. С. 43–46. [Lupyan E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V., Stytsenko F.V. Methodology of Estimation of Areas Covered by Forest Fires, Based on Satellite Observation Data. *Aerospace Methods and GIS-Technologies in Forestry, Forest Management and Ecology: Proceedings of the VI All-Russian Conference, Moscow, Russia, April 20–22, 2016*. Moscow, CEPF RAS Publ., 2016, pp. 43–46].

9. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017. Т. 14, № 6. С. 158–175. [Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Senko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G. Satellite Monitoring of Forest Fires in the 21st Century on the Territory of the Russian Federation (Facts and Figures Based on Active Fires Detection). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2017, vol. 14, no. 6, pp. 158–175]. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175)

10. Постановление Правительства Российской Федерации от 06.03.2012 № 194 «Об утверждении критериев оценки эффективности деятельности органов государственной власти субъектов Российской Федерации по осуществлению переданных полномочий Российской Федерации в области лесных отношений» (с изменениями на 06.03.2012). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» [*Decree of the Government of the Russian Federation Dated on March 6, 2012 No. 194 “On Approval of the Criteria for Evaluating the Effectiveness of Public Authorities of the Russian Federation Constituent Entities for the Implementation of the Transferred Powers of the Russian Federation in the Field of Forest Relations”*].

11. Приказ Минприроды России от 09.12.2014 № 545 «Об утверждении Методики оценки эффективности осуществления органами государственной власти субъектов Российской Федерации переданных в соответствии со статьей 83 Лесного кодекса Российской Федерации полномочий Российской Федерации в области лесных отношений»: зарегистрировано в Минюсте России 20.03.2015, № 36526. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» [*Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation Dated on December 9, 2014 No. 545 “On Approval of the Methodology for Assessing the Effectiveness of the Implementation of Powers of the Russian Federation, Transferred according to Article 83 of the Forest Code of the Russian Federation, by Public Authorities of the Russian Federation Constituent Entities in the field of Forest Relations”*]: Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on March 3, 2015, No. 36526].

12. Приказ Рослесхоза от 05.07.2011 № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды»: зарегистрировано в Минюсте России 17.08.2011, № 21649. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» [*Order of the Federal Agency for Forestry Dated on July 5, 2011 No. 287 “On Approval of the Classification of Forest Natural Fire Danger and Classification of Fire Danger in Forests Depending on Weather Conditions”*]: Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 17, 2011, No. 21649].

13. Софронов М.А., Гольдаммер И.Г., Волокутина А.В., Софронова Т.М. Пожарная опасность в природных условиях. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО

РАН, 2005. 330 с. [Sofronov M.A., Gol'dammer I.G., Volokitina A.V., Sofronova T.M. *Fire Hazard in Natural Conditions*. Krasnoyarsk, SIF SB RAS Publ., 2005. 330 p.].

14. Щетинский Е.А. Авиационная охрана лесов. М.: ФБУ ВНИИЛМ, 2001. 488 с. [Shchetinskiy E.A. *Aviation Protection of Forests*. Moscow, FBU VNIILM Publ., 2001. 488 p.].

15. Calkin D.E., Thompson M.P., Finney M.A., Hyde K.D. A Real-Time Risk Assessment Tool Supporting Wildland Fire Decisionmaking. *Journal of Forestry*, 2011, vol. 109, iss. 5, pp. 274–280. DOI: [10.1093/jof/109.5.274](https://doi.org/10.1093/jof/109.5.274)

16. McKenzie D., Littell J.S. Climate Change and the Eco-Hydrology of Fire: Will Area Burned Increase in a Warming Western USA? *Ecological Applications*, 2017, vol. 27, iss. 1, pp. 26–36. DOI: [10.1002/eap.1420](https://doi.org/10.1002/eap.1420)

17. Pérez-Sánchez J., Jimeno-Sáez P., Senent-Aparicio J., Díaz-Palmero J.M., Cabezas-Cerezo J.D. Evolution of Burned Area in Forest Fires under Climate Change Conditions in Southern Spain Using ANN. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, iss. 19, art. 4155. DOI: [10.3390/app9194155](https://doi.org/10.3390/app9194155)

18. Šturm T., Fernandes P.M., Šumrada R. The Canadian Fire Weather Index System and Wildfire Activity in the Karst Forest Management Area, Slovenia. *European Journal of Forest Research*, 2012, vol. 131, iss. 3, pp. 829–834. DOI: [10.1007/s10342-011-0556-7](https://doi.org/10.1007/s10342-011-0556-7)

19. Thompson M., Calkin D., Scott J.H., Hand M. Uncertainty and Probability in Wildfire Management Decision Support: An Example from the United States. *Natural Hazard Uncertainty Assessment: Modeling and Decision Support*. Washington, D.C., American Geophysical Union, 2017, pp. 31–41. DOI: [10.1002/9781119028116.ch4](https://doi.org/10.1002/9781119028116.ch4)

20. Van Wagner C.E. *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Forestry Technical Report 35. Ottawa, Canadian Forestry Service, 1987. 35 p.

21. *WMO Provisional Statement on the State of the Global Climate in 2019*. WMO, 2019. 34 p. Available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10108 (accessed 09.02.20).

AN INDICATOR FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF ORGANIZING FOREST FIRE PROTECTION

Roman V. Kotelnikov¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [B-2453-2018](https://orcid.org/0000-0002-9984-5913),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5913>

Alexander A. Martynyuk², Doctor of Agriculture, Corresp. Member of RAS; ResearcherID:

[AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

¹Center of the Forest Pyrology, Development of Forest Ecosystem Conservation, Forest Protection and Regeneration Technologies (Branch of FBU VNIILM), ul. Krupskoy, 42, Krasnoyarsk, 660062, Russian Federation; e-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

²All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow region, 141202, Russian Federation; e-mail: vniilm_martinuk@mail.ru

Abstract. The article briefly analyzes the main indicators used to assess the effectiveness of the organization of forest fire protection in the Russian Federation. The need to improve approaches to such an assessment has been substantiated. Based on the expert analysis of various situations and existing operational indicators of aviation forest protection units and regional dispatching services, it can be concluded that all possible factors that affect the effectiveness of work should be divided into two groups: organizational and weather-related. At the same time, all organizational factors ultimately affect the area covered by the fire. Weather factors cannot be controlled, and their influence must be excluded when calculating

performance indicators. Thus, all indicators that characterize the weather factor are directly or indirectly related. The article proves the expediency of using the indicator of fire season intensity to account for weather factors. It is proposed to calculate the relative deviation of the values of forest fire frequency and intensity from the average long-term values for assessing the effectiveness. The article provides a formula, an algorithm, and a number of recommendations for automating the calculation. A verbal-numerical scale of conditional assessment of the effectiveness of forest firefighting units is proposed. The interpretation of the values of the conditional indicator of the effectiveness of forest firefighting units for the selected scale is given. On the basis of the proposed method, an analysis of the effectiveness assessment of organizing forest fire protection in 2019 for all constituent entities of the Russian Federation is carried out. In the framework of the existing accounting system of forest fires, the cost of their suppression, as well as the features of existing system of account of funding of activities related to the protection of forests from fires, the proposed approach is optimal for assessing the forest fire service as it considers previous work experience in a variety of weather conditions. The proposed approach can be used in systems to support management decisions in the field of forest fire protection, which will significantly increase the adequacy of management decisions in the forest sector.

For citation: Kotelnikov R.V., Martynyuk A.A. An Indicator for Assessing the Effectiveness of Organizing Forest Fire Protection. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 213–222. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-213-222

Keywords: fire season severity, forest fire protection, effectiveness evaluation.

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
The author declare that there is no conflict of interest*

Поступила 30.03.20 / Received on March 30, 2020
