

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

6/384

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)  
**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

6/384

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)  
**Kozhukhov N.I.**, Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)  
**Korchagov S.A.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)  
**Kurov V.S.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)  
**Lupascu T.G.**, Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)  
**Matveeva R.N.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)  
**Merzlenko M.D.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)  
**Myasishchev D.G.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Nakvasina E.N.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Niemz P.**, PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)  
**Oblivin A.N.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)  
**Onegin V.I.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)  
**Pamfilov E.A.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)  
**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

|  |     |
|--|-----|
| <i>Н.Ф. Кузнецова, Е.С. Клушевская, Е.Ю. Аминева.</i> Высокопродуктивные сосновые леса в условиях изменяющегося климата.....   | 9   |
| <i>В.Л. Гавриков, А.И. Фертиков, Р.А. Шарафутдинов, Е.А. Ваганов.</i> Изменчивость элементного состава годичных колец хвойных пород.....   | 24  |
| <i>А.П. Царев, Н.В. Лаур, В.А. Царев, Р.П. Царева.</i> Современное состояние лесной селекции в Российской Федерации: тренд последних десятилетий.....  | 38  |
| <i>Г.Г. Терехов, Е.М. Андреева, С.К. Стеценко.</i> Оценка культур кедра сибирского в конце первого класса возраста.....  | 56  |
| <i>А.А. Парамонов, С.В. Третьяков, С.В. Коптев, А.П. Богданов, И.В. Цветков.</i> Таблицы объемов стволов по разрядам высот ивы древовидной северотаежного района европейской части Российской Федерации..... | 69  |
| <i>Е.М. Царев, К.П. Рукомойников, С.Е. Анисимов, Д.С. Татаринов.</i> Технология воспроизводства пихты для получения хвойной лапки.....   | 79  |
| <i>С.С. Макаров, Г.В. Тяк, И.Б. Кузнецова, А.И. Чудецкий, С.Ю. Цареградская.</i> Получение посадочного материала <i>Rubus arcticus</i> L. методом клонального микро-размножения.....                         | 89  |
| <i>Л.А. Семкина, Е.А. Тишкина.</i> Рост и продуктивность инорайонных древесных видов в условиях Среднего Урала.....  | 100 |
| <i>С.А. Корчагов, Р.С. Хамитов, С.Е. Грибов, М.Г. Иванова (Комисарова), Д.В. Беляков.</i> Лесоводственно-хозяйственная оценка объектов биологического разнообразия в таежной зоне.....                       | 110 |

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

|   |     |
|---|-----|
| <i>С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, О.А. Куницкая, О.И. Григорьева.</i> Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах.....         | 121 |
| <i>Е.А. Памфилов, В.В. Капустин, Г.А. Пилюшина, Е.В. Шевелева.</i> Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров..... | 135 |

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| <i>V.I. Fedyukov, V.Yu. Chernov, M.S. Chernova, O.V. Tsoy.</i> Interrelations of Wood Physical and Mechanical Properties and Patterns of Their Change within the Birch Stem..... | 150 |
|--|-----|

- 
- А.С. Торопов, В.Е. Бызов, Е.В. Торопова, А.В. Сергеевичев, Е.В. Сазанова.* Раскрой круглых сортиментов с ядровой гнилью на конструкционные пиломатериалы.... 160

*ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ*

- А.И. Сизов, С.Д. Пименов, А.Д. Строительева, Е.Д. Строительева.* Отбелка микрокристаллической целлюлозы, полученной методом газофазного гидролиза... 173
- В.А. Плахин, Ю.Г. Хабаров, В.А. Вешняков.* Синтез коллоидного серебра с использованием лигносульфонатов..... 184
- О.С. Якубова, Е.Ю. Демьянцева, Р.А. Смит, В.К. Дубовый.* Анализ мицеллообразования и адсорбционных слоев бинарных смесей компонентов сульфатного мыла..... 196
- Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2021 г..... 206
- 
-



## CONTENTS

## FORESTRY

|   |     |
|---|-----|
| <i>N.F. Kuznetsova, E.S. Klushevskaya, E.Yu. Amineva.</i> Highly Productive Pine Forests in a Changing Climate.....   | 9   |
| <i>V.L. Gavrikov, A.I. Fertikov, R.A. Sharafutdinov, E.A. Vaganov.</i> Variability in Elemental Composition of Conifer Tree Rings.....  | 24  |
| <i>A.P. Tsarev, N.V. Laur, V.A. Tsarev, R.P. Tsareva.</i> The Current State of Forest Breeding in the Russian Federation: The Trend of Recent Decades.....  | 38  |
| <i>G.G. Terekhov, E.M. Andreeva, S.K. Stetsenko.</i> Evaluation of Siberian Stone Pine Plantations at the End of the First Age Class.....   | 56  |
| <i>A.A. Paramonov, S.V. Tretyakov, S.V. Koptev, A.P. Bogdanov, I.V. Tsvetkov.</i> Stem Volume Tables by Height Classes of Willow Trees in the Northern Taiga Region of the European Part of the Russian Federation..... | 69  |
| <i>E.M. Tsarev, K.P. Rukomojnikov, S.E. Anisimov, D.S. Tatarinov.</i> Fir Reproduction Technology for Harvesting Coniferous Boughs.....   | 79  |
| <i>S.S. Makarov, G.V. Tyak, I.B. Kuznetsova, A.I. Chudetsky, S.Yu. Tsaregradskaya.</i> Producing Planting Material of <i>Rubus arcticus</i> L. by Clonal Micropropagation.....  | 89  |
| <i>L.A. Semkina, E.A. Tishkina.</i> Growth and Productivity of Non-Indigenous Woody Species in the Middle Urals.....  | 100 |
| <i>S.A. Korchagov, R.S. Khamitov, S.E. Gribov, M.G. Ivanova (Komisarova), D.V. Belyakov.</i> Forest Management Assessment of Biodiversity in the Taiga Zone.....  | 110 |

## LOGGING TECHNOLOGIES

|  |     |
|--|-----|
| <i>S.E. Rudov, V.Ya. Shapiro, I.V. Grigorev, O.A. Kunitskaya, O.I. Grigoreva.</i> Modeling the Interaction of Forest Machines with Soil when Working on Slopes.....          | 121 |
| <i>E.A. Pamfilov, V.V. Kapustin, G.A. Pilyushina, E.V. Sheveleva.</i> Improving the Performance of Working Bodies and Tribosystems of Harvester Technological Equipment..... | 135 |

## MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

|  |     |
|--|-----|
| <i>V.I. Fedyukov, V.Yu. Chernov, M.S. Chernova, O.V. Tsoy.</i> Interrelations of Wood Physical and Mechanical Properties and Patterns of Their Change within the Birch Stem..... | 150 |
| <i>A.S. Toropov, V.E. Byzov, E.V. Toropova, A.V. Sergeevichev, E.V. Sazanova.</i> Cutting of Round Timber with Heart Rot to Structural Lumber.....                               | 160 |

---

*CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD*

|  |     |
|--|-----|
| <i>A.I. Sizov, S.D. Pimenov, A.D. Stroiteleva, K.D. Stroiteleva. Bleaching of Microcrystalline Cellulose Produced by Gas-Phase Hydrolysis.....</i>                       | 173 |
| <i>V.A. Plakhin, Yu.G. Khabarov, V.A. Veshnyakov. Synthesis of Colloidal Silver Using Lignosulfonates.....</i>   | 184 |
| <i>O.S. Yakubova, E.Yu. Demiantseva, R.A. Smit, V.K. Dubovy. Analysis of Micelle Formation and Adsorption Layers of Binary Mixtures of Sulphate Soap Components.....</i> | 196 |
| <i>Index of Articles Published in the Russian Forestry Journal in 2021.....</i>  | 206 |

---

---



УДК 630\*161.02+630\*174.754

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-9-23

## ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫЕ СОСНОВЫЕ ЛЕСА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

*Н.Ф. Кузнецова, канд. биол. наук; ResearcherID: [H-7344-2014](https://orcid.org/0000-0001-9947-6698),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9947-6698>*

*Е.С. Клушевская, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3470>*

*Е.Ю. Аминова, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [S-8866-2019](https://orcid.org/0000-0001-6800-7944),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6800-7944>*

Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: [nfsenyuk@mail.ru](mailto:nfsenyuk@mail.ru), [ekogenlab@gmail.com](mailto:ekogenlab@gmail.com)

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 28.02.20 / Принята к печати 15.06.20

---

**Аннотация.** Лесостепь Центрально-Черноземного района относится к зоне высокопродуктивных сосновых лесов. В 2015 г. на его территории впервые зафиксирована частичная, затронувшая популяционный, организменный и клеточный уровни дестабилизация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Дестабилизация вызвана 8-летней тепловой волной 2007–2014 гг., сопровождавшейся резким падением уровня грунтовых вод и четырьмя сильными засухами (2007, 2010, 2012 и 2014 гг.). Анализ проводили на двух участках лесных культур сосны, произрастающих на экологически благоприятной территории: Ступинский тест-объект (Воронежская обл., типичное для Центрально-Черноземного р-на насаждение) и Усманский объект (Липецкая обл., земли с повышенным уровнем грунтовых вод). Представлены результаты морфологического, цитогенетического и биохимического изучения модельных деревьев Ступинского тест-объекта в периоды: 4 оптимальных по погодным условиям года, засушливый 2014 г. и 2015 г. – год дестабилизации. Выявлено, что продолжительный гидротермический стресс вызвал переход сосны из основного равновесного состояния в слабо неравновесное состояние. Пусковым механизмом стала сильная почвенная засуха 2014 г., после которой растения ушли в зиму ослабленными. В 2015 г., несмотря на то, что он был оптимальным по погодным условиям, отмечены уменьшение биопродуктивности шишек по признакам полнозернистости и общему числу семян на шишку, изменение структурированности популяционной выборки, увеличение числа патологий митоза, повышение содержания пролина в хвое. Процесс возвращения вида в исходное состояние изучался 3 последующих оптимальных года на примере ступинской и усманской популяций. Экспериментальные данные свидетельствуют, что процессы нормализации жизненного состояния сопряжены с глубокими изменениями метаболизма и требуют определенных энергетических затрат. Ступинской популяции для возвращения к региональной норме понадобилось больше времени. Это указывает на разную глубину дестабилизации генетического материала деревьев двух исследуемых популяций.

**Для цитирования:** Кузнецова Н.Ф., Клушевская Е.С., Аминова Е.Ю. Высокопродуктивные сосновые леса в условиях изменяющегося климата // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-9-23

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, семенная продуктивность, пролин, патологии митоза, норма реакции, равновесное состояние, дестабилизация, засуха.

## HIGHLY PRODUCTIVE PINE FORESTS IN A CHANGING CLIMATE

*Nina F. Kuznetsova*, Candidate of Biology; ResearcherID: [H-7344-2014](https://orcid.org/0000-0001-9947-6698),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9947-6698>

*Elena S. Klushevskaya*, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3470>

*Elena Yu. Amineva*, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [S-8866-2019](https://orcid.org/0000-0001-6800-7944),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6800-7944>

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: [nfsenyuk@mail.ru](mailto:nfsenyuk@mail.ru), [ekogenlab@gmail.com](mailto:ekogenlab@gmail.com)

---

Original article / Received on February 28, 2020 / Accepted on June 15, 2020

---

**Abstract.** Forest steppe of the Central Chernozem Region (CCR) of Russia belongs to the zone of highly productive pine forests. In 2015, for the first time a partial destabilization of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) was recorded within the territory of the CCR. It affected the population, organism and cellular levels of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). The destabilization was caused by the 8-year heatwave of 2007–2014 followed by a sharp drop in the water table and four severe droughts (2007, 2010, 2012, and 2014). The analysis was carried out on two sites of pine forest plantations growing in the environmentally sound region: the Stupino test site (Voronezh region, typical plantation for the CCR) and the Usman site (Lipetsk region, lands with elevated groundwater level). The results of morphological, cytogenetic and biochemical studies of model trees of the Stupino test site during the following periods are presented: 4 optimal years in terms of weather conditions, 2014 drought year and 2015 destabilization year. It was found that prolonged hydrothermal stress resulted in the transition of pine from the basic equilibrium state to a slightly nonequilibrium state. The trigger mechanism for changing their vital state was a severe autumn soil drought in 2014, after which the plants became weakened right before winter. A decrease in cone bioproductivity by the traits of seed fullness and the total number of seeds per cone, a change in population sampling structure, an increase in the number of mitosis pathologies, and an increase in proline content in needles were observed despite optimal weather conditions in 2015. The recovery of species was studied for three subsequent optimal years on the example of the Stupino and Usman populations. Experimental data indicate that the processes of vital state normalization involve profound changes in metabolism and require certain energy expenditures. It took the Stupino population longer to return to the regional norm, which indicates a different depth of destabilization of the tree genetic material of the studied populations.

**For citation:** Kuznetsova N.F., Klushevskaya E.S., Amineva E.Yu. Highly Productive Pine Forests in a Changing Climate. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-9-23

**Funding:** The research was carried out within the framework of the state assignment of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology.

**Keywords:** Scots pine, seed productivity, proline, mitosis pathologies, reaction norm, equilibrium state, destabilization, drought.

---

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

### Введение

Лесостепь Центрально-Черноземного района (ЦЧР) до середины XX столетия характеризовалась гомеостазом (постоянством) природной среды. Исторически здесь взаимодействовали две формации: лес и степь. Их пространственно-функциональные связи находились под влиянием температуры, влажности почвы и воздуха. На юге видового оптимума сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) достаточно сбалансировано соотношение имеющихся ресурсов и потребностей этого дерева, что обуславливало высокий бонитет сосновых лесов, наиболее благоприятную для отдельных экземпляров плотность распределения популяций, численность в них растений, равновесие между половой репродукцией и выживаемостью деревьев, соответствие подавляющего числа растений генотипической и фенотипической норме и др. В настоящее время естественные сосновые боры на территории ЦЧР сохранились в основном в заповедниках. В регионе прогнозируют ухудшение ситуации [32]. Есть вероятность дестабилизации сосновых лесов, трансформации в элемент переключения (tipping element) [27, 30] и реализации самого негативного сценария – последующей их гибели. Этот прогноз уже частично подтвердился: усилилась континентальность климата, понизился уровень грунтовых вод, увеличилось число засух [8, 12]. С 2010 г. отмечается депрессия прироста сосны, пыление сместилось на более ранние сроки [8, 10].

В центре ареала сосна встречается в двух жизненных состояниях [31, 34]: основном равновесном и слабо неравновесном. Основное равновесное состояние – зона видового оптимума. Большинство деревьев в популяциях соответствуют генотипической и фенотипической норме вида, максимально обеспечивают передачу наследственной информации от родителей к потомкам, на базе неспецифической и специфической реакции реагируют на погодный стресс [28]. При устранении внешнего воздействия система возвращается в исходное состояние. Слабо неравновесное состояние (частичная, глубокая, полная дестабилизация) – зона видового оптимума и пессимума (южная и северная граница ареала, болота, высокогорья, техногенно загрязненные территории). При частичной и глубокой дестабилизации популяции деревьев характеризуются повышенной изменчивостью признаков, стерильностью, пониженной жизнеспособностью, более слабым откликом на дополнительный стресс, карликовостью и уродствами. В пессимальной зоне эти качества сохраняются в системе «родители–потомки», что указывает на стабильность данного жизненного состояния. При полной дестабилизации происходит гибель растений и лесных экосистем – необратимый, предсказуемый из-за нарушений, несовместимых с жизнью, конечный результат.

Цель исследований – оценка изменчивости морфологических, биохимических и цитогенетических признаков сосны обыкновенной на основе изучения процессов, происходящих на Ступинском тест-объекте в год дестабилизации и в предшествующие ему оптимальный и засушливый годы, и семенной продуктивности шишек в контрастных местообитаниях ступинской и усманской популяций сосны в оптимальные годы.

### Объекты и методы исследования

Исследования проводили на двух экспериментальных площадках, примыкающих к Воронежскому биосферному заповеднику. Ступинский тест-объект

(контроль) с 1987 г. является местом изучения систем семенного размножения сосны. Это типичное для ЦЧР по вегетативной и семенной продуктивности насаждение сосны, произрастающее на песчаном склоне левого берега р. Воронеж (Воронежская обл., Рамонский р-н, 55–60-летние культуры, 30 дер.). Территория относится к числу эталонных земель с ненарушенным растительным покровом [17]. Тип условий местности – А<sub>2</sub>, сосняк травяной, тип почвы – влажные пески, что подходит для сосны. Усманский опытный объект находится северо-восточнее контрольного на 25–30 км (Липецкая обл., Усманский р-н, 30-летние лесные культуры, 30 дер.). Насаждение расположено в бассейне р. Усманки и ее притока Девицы на землях с высоким уровнем залегания грунтовых вод (не глубже 1 м), поэтому гидрологические риски для данного лесного массива в засуху существенно ниже, чем для ступинской популяции.

Все деревья контрольного и опытного объектов относятся к категории нормальных деревьев. По состоянию – здоровые, по семенной и вегетативной продуктивности – плюсовые, нормальные лучшие, нормальные. Интенсивность семеношения оценивали визуально по обилию шишек с применением 5-балльной шкалы В.Г. Каппера. С каждого дерева брали по 10–14 неповрежденных шишек и определяли число полных и пустых семян. Полнозернистость вычисляли для каждого дерева и объекта как отношение количества полных семян к общему числу семян. Для определения частотности весь диапазон изменчивости деревьев в оптимальные годы был разбит на 4 класса продуктивности. Полнозернистость семян в границах: I – 0,0–24,9 %; II – 25,0–49,9 %; III – 50,0–74,9 %; IV – 75,0–100,0 %; число семян на шишку: I – 0,0–9,9 семян; II – 10,0–19,9 семян; III – 20,0–29,9 семян; IV – 30,0 семян и выше.

Биохимические исследования начаты в 2013 г. Образцы хвои отбирали в начале 3-й декады мая с побегов 2-го года жизни (Ступинский тест-объект, 11 модельных дер.). Содержание свободного пролина определяли в воздушно-сухих пробах методом Bates [22] с использованием нингидринового реактива (30 мл ледяной уксусной кислоты + 20 мл 6М H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 1,25 г нингидрина). Интенсивность окраски оценивали спектрофотометрическим методом при длине волны  $\lambda = 520$  нм. Полученное значение пересчитывали в мкмоль/г, учитывая массу навески и объем экстракта.

Цитогенетический мониторинг семенного потомства 6 модельных деревьев сосны Ступинского тест-объекта проводится с 2010 г. Проростки корешков длиной 0,5–1,0 см фиксировали в утренние часы в спиртово-уксусной смеси. Давленные препараты (10 корешков проростков для каждого дерева) изготавливали по методике Л.А. Топильской и др. [18] и окрашивали ацетогематоксилином. Анализировали не менее 100 делящихся клеток корневой меристемы с каждого препарата. Микросъемку проводили с помощью цифровой камеры окуляра DCM500 (WEBBERS Myscope 500 M). Учитывали частоту и спектр патологий митоза (ПМ).

Статистическую обработку результатов осуществляли с помощью программы Statistica 6. Для сравнения выборок разных лет по патологиям митоза и содержанию пролина использовали непараметрический X-критерий Ван-дер-Вардена, т. к. эти признаки не подчиняются нормальному распределению.

За годы мониторинга в регионе произошло 7 засух. Последние 4 сильные засухи (2007, 2010, 2012, 2014 гг.) сопровождалась понижением уровня грун-

товых вод (с 2–3 до 5–6 м) и представляют собой самую продолжительную и мощную тепловую волну за всю историю метеонаблюдений [8].

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Устойчивость равновесных лесных экосистем проявляется в способности сохранять ими характеристики видовой нормы до определенных пределов флуктуации внешней среды [14, 35]. Многие признаки вегетативной и генеративной сферы сосны обыкновенной достаточно изменчивы, что обеспечивает жизнеспособность и экологическую стабильность вида на большей части ареала.

*Оптимальные годы.* Мониторинг генеративной сферы сосны в условиях лесостепного района ЦЧР проводится с начала 70-х гг. XX в. [2, 3, 15, 29]. Интенсивность цветения исследуемых популяций в оптимальные по погодным условиям годы высокая – 4 балла (2–5 баллов у отдельных деревьев). Показатели семенной продуктивности – полнозернистость и число семян на шишку – являются генетически обусловленными и экологически зависимыми. Они, как и все количественные признаки, характеризуются потенциальной и реализованной (адаптивной) нормой реакции.

Потенциальная норма реакции по полнозернистости семян составляет 0–100 %. Реализованная норма оптимальных лет вдвое уже потенциальной и смещена к левому пределу. Урожайность сосны в типичные по погодным условиям годы на обоих объектах высокая (рис. 1, а). Модальные значения признака изменяются от 76,2 до 87,7 %; у деревьев – 49,2–95,7 % (Ступино) и 67,0–96,8 % (Усмань) [28]. 4/5 растений от объема выборок составляет высокопродуктивный IV класс, во II класс входят единичные формы, а I – отсутствует.

Потенциальная норма реакции по числу семян на шишку – 0–50 шт. Ее максимальную амплитуду мы приняли за 100 %. Число семян на обоих объектах соответствует региональной норме (22–23 шт., рис. 1, б) при варьировании средних значений признака 19,6–26,1 шт. (Ступино) и 20,8–25,5 шт. (Усмань). У деревьев ее размах равен 6,8–44,0 шт. (Ступино) и 7,5–46,9 шт. (Усмань), это составляет соответственно 74,4 и 78,8 % от потенциальной. Большая часть растений и модальные значения признака приходятся на область II и III класса бонитета. В I низко- и IV высокопродуктивный класс входят по 2–4 растения. Такие данные свидетельствуют о том, что обе популяции находятся в равновесном состоянии и достаточно устойчивы к засухе – основному типу погодного стресса в регионе. В оптимальные годы различия между ступинской и усманской популяциями по признакам полнозернистости и числу семян статистически недостоверны.

Частота и спектр аномалий митоза, которые в системе «норма–патология» отражают степень нарушения хромосомного аппарата хвойных растений, являются наиболее чувствительными к погодному стрессу параметрами [5, 25]. Установлено, что у семенного потомства деревьев ступинского объекта в оптимальные годы уровень частоты ПМ составляет  $1,4 \pm 0,2$  %, что в 3,5 раза ниже нормы спонтанного мутирования 5 % [1].

Вегетативная сфера сосны ступинской популяции оценивалась весной и осенью по содержанию пролина в свежесобранной хвое модельных деревьев. Доказано, что данная аминокислота вырабатывается в значительных количествах в клетках в ответ на засуху и повышенную температуру [7, 36].

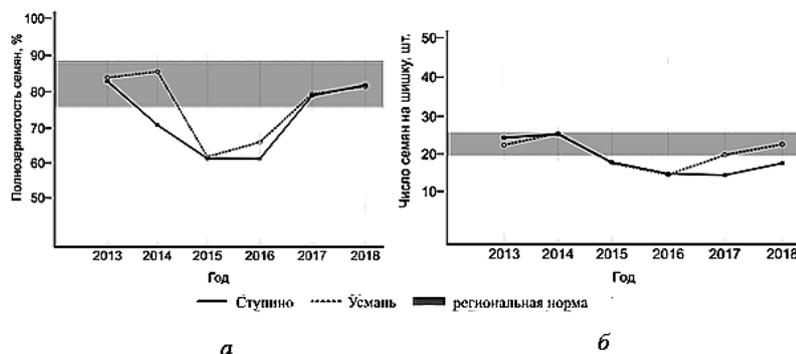


Рис. 1. Динамика изменения полнозернистости семян (а) и числа семян на шишку (б) для ступинской и усманской популяций сосны обыкновенной в течение 6 лет: оптимальные 2013, 2016–2018 гг., засушливый 2014 г. и 2015 г. – год дестабилизации

Fig. 1. Dynamics of changes in seed fullness (a) and number of seeds per bud (b) for the Stupino and Usman populations of Scots pine over 6 years: 2013, 2016–2018 optimal years, 2014 drought year and 2015 destabilization year

Пролин как стрессовый метаболит обладает полифункциональными свойствами: поддерживает внутриклеточный гомеостаз, способствует адаптации растений к неблагоприятным условиям [24, 36]. На рис. 2 представлена динамика изменения содержания пролина в образцах хвои в 2013–2015 гг. Весной оптимального 2013 г. хвоя содержала небольшое количество пролина –  $2,96 \pm 0,27$  мкмоль/г (варьирование признака –  $1,84$ – $4,53$  мкмоль/г) [6]. Осенью его концентрация стала несколько выше,  $3,75 \pm 0,50$  мкмоль/г. Амплитуда изменчивости увеличилась за счет сдвига верхней границы,  $1,86 \pm 0,02$ – $8,35 \pm 0,33$  мкмоль/г. Различия между весенними и осенними пробами статистически недостоверны.

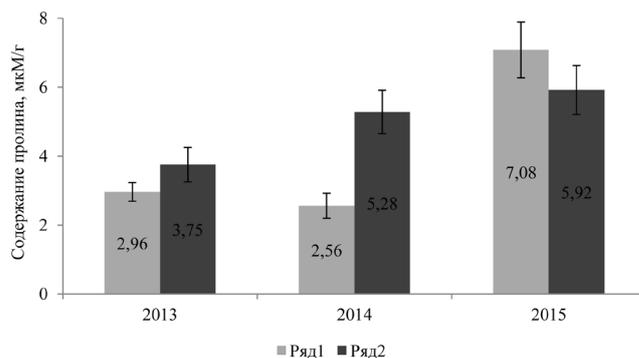


Рис. 2. Содержание пролина (мкмоль/г) в хвое сосны обыкновенной: весенние (ряд 1) и осенние (ряд 2) образцы

Fig. 2. Proline content ( $\mu\text{mol/g}$ ) in Scots pine needles: spring (row 1) and autumn (row 2) samples

*Засушливый 2014 год.* Выживание растений в экстремальных погодных условиях требует энергетических затрат [23, 26]. Считается, что стабильность деревьев и популяций в такие годы достигается направлением энергетических потоков или на защиту, или на онтогенез, или на половые процессы (чаще перераспределение между перечисленным) [13, 33]. В первом случае от засухи больше страдает генеративная сфера, во втором – развитие дерева, в третьем – частично функционирование обеих систем. Показано, что засуха инициирует

развитие у сосны неспецифической и специфической реакций [28]. На следующий год стресс-реакция исчезает, а генетическая система возвращается к региональной норме. Способность популяций к самовосстановлению после засухи, во-первых, является одним из показателей устойчивости вида к погодному стрессу и, во-вторых, свидетельствует, что популяции находятся в равновесном состоянии.

В 2014 г. наблюдалось два засушливых периода – слабая весенняя атмосферная и осенняя почвенная засухи. Весенняя засуха привела к незначительному снижению урожайности сосны ступинской популяции. Уровень полнозернистости выборки составил  $71,0 \pm 1,8$  %, что на 12 % ниже показателя оптимальных лет. Диапазон изменчивости признака увеличился до 37,7–88,9 %. Число семян в шишках соответствовало числу в хорошие по погодным условиям годы ( $25,2 \pm 1,5$  шт. при вариации 9,1–42,1 шт.). Генеративная сфера усманской популяции от данной засухи не пострадала: полнозернистость и число семян на шишку –  $85,6 \pm 2,1$  % и  $25,5 \pm 2,0$  шт. соответственно. Значимые различия выявлены только для полнозернистости.

Число ПМ у семенного потомства увеличилось почти вдвое ( $2,7 \pm 0,3$  %), это достоверно выше, чем в предыдущем оптимальном году. В засуху 2010 г. спектр ПМ представлен 9–10 типами нарушений, в 2014 г. их количество уменьшилось до 7 [11]. Мосты на стадиях ана- и телофазы являются преобладающим типом структурных нарушений. По литературным данным, увеличение их частоты в спектре ПМ свидетельствует об активности функционирования систем репарации в клетках [4].

В весенних пробах хвои содержание пролина осталось на уровне 2013 г. –  $2,56 \pm 0,36$  мкмоль/г в пределах  $1,32 \pm 0,14$ – $5,07 \pm 0,01$  мкмоль/г, т. к. в мае количество почвенной влаги еще было достаточным. Произошло лишь расширение в 1,4 раза границ признака. В ноябре (конец 2-го засушливого периода) средние значения выросли почти в 1,5 раза за счет существенного смещения нижней границы в сторону больших показателей. Минимум составил  $3,11 \pm 0,06$  мкмоль/г, что в 1,7 раза выше минимума осени 2013 г. и практически сопоставимо со средними показателями. Максимальные значения  $8,36 \pm 0,02$  мкмоль/г не отличаются от максимума 2013 г. Достоверные отличия между образцами двух лет не зафиксированы.

В засуху погодный стресс, то усиливаясь, то ослабевая, «расшатывает» популяции и растения на всех уровнях организации. Изменчивость признаков, как правило, не выходит за пределы равновесного состояния. В последний год тепловой волны состояние генеративной сферы деревьев Усмани и Ступино было близким к нормальному. Отклик ступинской популяции на слабую весеннюю засуху типичен для генеративной сферы сосны. На популяционном уровне это первая ступень трансформации семенного генофонда, протекающая на базе неспецифической и специфической реакций [28]. Погодный стресс отразился на полнозернистости семян и числе ПМ, в то время как их спектр и число семян на шишку остались на уровне оптимальных лет. Как показывает биохимический анализ, осенью вегетативная сфера сосны, вероятно, еще находилась в состоянии равновесия.

*Дестабилизация сосны.* В ЦЧР негативные последствия глобального изменения климата становятся все более явными [8, 12]. Каждое десятилетие оказывается теплее предыдущего, ежегодно фиксируются новые температурные

рекорды, увеличиваются число волн тепла и напряженность засух. Тепловая волна 2007–2014 гг. была самой мощной и продолжительной. 4-я ее засуха существенно усугубила экологическую ситуацию в регионе. Количество осадков за вегетационный сезон 2014 г. составило 55 % от нормы. Осенью осадков выпало менее 20 % от нормы: сентябрь – 8 %, октябрь – 36 %, ноябрь – 15 %. Обмелели реки. В октябре уровень грунтовых вод в Докучаевском колодце снизился до 7,6 м. Сосна ушла в зиму в ослабленном состоянии. В сентябре у многих деревьев начали раскрываться шишки, пожелтела и стала массово опадать хвоя. Вероятность перехода сосновых лесов из равновесного в слабо неравновесное состояние существенно возросла. Для реализации необходим был лишь небольшой толчок. Весной таким толчком, вероятно, стал выход сосны из состояния покоя.

2015 г. был оптимальным по погодным условиям. Среднегодовое количество осадков соответствовало многолетней норме (96,2 %). В течение года они выпадали равномерно. Уровень грунтовых вод колебался в пределах 5–6 м. Однако сосна, несмотря на благоприятные погодные условия, не вернулась к региональной норме. Такое произошло впервые за историю наблюдений. Интенсивность цветения и семеношения снизилась на 7 объектах Воронежской, Липецкой и Белгородской областей. Признаком ослабления сосновых лесов ЦЧР стало широкое распространение в 2015–2016 гг. очагов соснового пилильщика. Осенью значительная часть шишек на деревьях была повреждена личинками шишковой смолевки. В августе отмечены пожелтение хвои, частичная дефолиация крон.

Эти данные свидетельствуют, что произошло переключение популяций сосны на качественно другой тип упорядоченности. Покинув равновесное состояние, они сменили его на энергетически менее затратное слабо неравновесное состояние (частичной дестабилизации). Слабо неравновесные системы – это системы, которые способны достичь состояния нового равновесия в измененных условиях [19]. На такие системы распространяются законы термодинамики, их поведение достаточно предсказуемо. До достижения критического уровня изменения идут по накопительному принципу, смена типа осуществляется скачкообразно. Она затрагивает клеточный, организменный и популяционный уровни организации вида.

Биохимические исследования подтвердили смену жизненного состояния сосны. Сравнивая соотношение между образцами проб, видим, что в мае 2015 г. произошел резкий скачок концентрации пролина в хвое (см. рис. 2). Его содержание составило  $7,08 \pm 0,81$  мкмоль/г, статистически достоверное превышение – 2,4 раза по сравнению с весенними и 1,9 раза по сравнению с осенними показателями 2013 г.; 2,8 раза по сравнению с показателями весны 2014 г. Амплитуда признака достигла максимума – 7 мкмоль/г ( $4,12 \pm 0,1$  до  $11,21 \pm 0,28$  мкмоль/г).

Частичный дисбаланс – один из способов выживания вида в условиях, когда его биология и экологическая ниша перестают совпадать полностью. По теории стресса [16], сосна весной находилась в фазе шока. Уровень пролина был максимальным. В это время реализуются возможности растений к адаптации под условия среды в новом жизненном состоянии, происходит поиск путей изменения внутриклеточного метаболизма. Затем начинается непосредственно перестройка метаболизма, а за ней следует фаза стабилизации, когда растения

приспосабливаются к функционированию в условиях слабо неравновесной системы. Осенью наметилась лишь неотчетливая тенденция снижения в 1,2 раза концентрации пролина ( $5,92 \pm 0,71$  мкмоль/г). При этом область распределения признака высокая – 8,66 мкмоль/г. Максимальные значения сохраняются на прежнем уровне  $11,28 \pm 0,17$  мкмоль/г, тогда как минимальные приблизились к уровню оптимальных лет  $2,62 \pm 0,11$  мкмоль/г.

Дестабилизация затронула оба признака биопродуктивности шишек. Средняя полнозернистость составила  $61,4 \pm 3,6$  %, что достоверно ниже полнозернистости в оптимальные годы на 25 % и в засушливый 2014 г. – на 13,5 % (см. рис. 1, а). Амплитуда изменчивости деревьев увеличилась, и реализованная норма реакции приблизилась к потенциальной (16,2–87,2 %). Асимметричный характер кривой распределения деревьев кардинально изменился. Мода признака переместилась в область III класса. Число высокопродуктивных форм снизилось более чем в 2,5 раза, низкопродуктивного II класса, наоборот, повысилось. Появились два растения, полнозернистость которых соответствует I классу. Число семян на шишку уменьшилось на 20 % ( $18,0 \pm 1,3$  шт.), структура выборки изменилась (см. рис. 1, б). Верхняя граница реализованной нормы реакции сдвинулась в область более низких значений, диапазон изменчивости стал уже (8,3–28,0).

Реакция усманской популяции, не пострадавшей от засухи 2014 г., на смену жизненного состояния была аналогичной (см. рис. 1, а). Урожайность резко снизилась относительно уровня двух предыдущих лет: полнозернистость –  $61,6 \pm 3,4$  %; число семян –  $17,7 \pm 1,8$  шт. При этом значения сопоставимы с показателями ступинской популяции. Распределение деревьев по классам продуктивности такое же, как на контрольном объекте, а диапазон изменчивости признаков несколько шире (14,7–89,9 % и 9,8–34,4 шт.). Различия между показателями двух предыдущих лет достоверны. Полученные данные свидетельствуют о том, что на обоих объектах произошла разбалансировка систем семенного размножения сосны.

Частота ПМ в 2015 г. соответствует показателю предыдущего засушливого года и вдвое ниже уровня оптимальных лет. Максимальный показатель отмечен у дерева № 98 ( $4,5 \pm 1,1$  %). Качество семенного потомства после перехода насаждений в слабо неравновесное состояние в целом удовлетворительное.

Обращаясь к причинам дестабилизации, отметим, что переход сосновых лесов в слабо неравновесное состояние сопряжен с понижением их энергетического статуса. Растения вынуждены тратить часть энергии на поддержание гомеостаза в условиях более сухого и теплого климата. Пониженный уровень энергии не может обеспечить высокую упорядоченность систем, это ведет к уменьшению продуктивности деревьев и увеличению изменчивости признаков и процессов по причине прямой связи энергии, структуры и функции. Индивидуальные нормы реакции расширяются и перекрываются, отклик растений на дополнительную стрессовую нагрузку становится более сглаженным, а групповая изменчивость исчезает [9].

*Выход из состояния дестабилизации.* Любая неравновесная система при нормализации внешних условий стремится вернуться в равновесие. Информация о продолжительности и этапах перехода сосны к региональной норме (с уровня энергетически более низкого к высокому) в условиях *ex situ* отсутствует. Как отмечалось, переключение развития с одного типа системы на другой и адаптация к ним связаны с перестройкой внутриклеточного метаболизма. Однако если

при переходе из равновесного в более низкое, неравновесное, состояние высвобождаемая энергия становится источником энергии для перестройки метаболизма, то для реализации обратного процесса растение должно решить проблему аккумуляции ресурсов, а они могут накапливаться только в оптимальные годы.

Температурный режим 2016–2018 гг. соответствовал региональной норме или несколько превышал ее. 2016 г. был дождливым. В апреле выпал 431 % от нормы осадков, и в почве скопился достаточный запас влаги. В 2017 г. количество осадков находилось на уровне оптимальных лет. Зима и весна 2018 г. характеризовались обильными снегопадами и дождями. Повышенный уровень грунтовых вод сохранялся до конца июня. На рис. 1 приведена динамика изменения урожайности ступинской и усманской популяций в течение трех оптимальных лет.

Анализ структуры урожая 2016 г. ступинской популяции показал, что биопродуктивность шишек уменьшилась только по числу семян. Полнозернистость осталась на уровне предыдущего года –  $61,1 \pm 3,4$  %. Наметилась лишь тенденция к сужению диапазона изменчивости признака (27,8–86,9 %), что отразилось на структурированности выборки. Исчез I низкопродуктивный класс, и число классов сократилось до трех. Только на 3-й год начался активный выход сосны из состояния дестабилизации. Благоприятные погодные условия вегетационного сезона 2017 г. во многом способствовали этому: ровные по температурному режиму май–июль и достаточный запас влаги в почве из-за обильных дождей в апреле–мае. Урожайность сосны в этот год повысилась на 23 % и вышла на нижний уровень региональной нормы ( $78,9 \pm 2,1$  %). Размах варьирования признака и его структурированность оказались в соответствии с региональной нормой (45,9–94,9 %). В 2018 г. урожайность сосны вернулась к норме и составила  $82,7 \pm 1,3$  %.

В 2016 г. модальное значение по числу семян стало меньше на 18 %, чем в 2015 г.:  $14,7 \pm 1,2$  шт., при размахе варьирования признака 4,5–27,5 семян. Различия с 2013 и 2014 гг. являются достоверными. Количество деревьев низкопродуктивного I класса достигло 7. В 2017 г. оно стабилизировалось на минимальном уровне ( $14,1 \pm 1,7$  семян), число экземпляров I класса сократилось с 7 до 4. Только на 3-й год началось повышение показателей. В 2018 г. семян стало  $17,4 \pm 0,9$  шт., что, однако, меньше региональной нормы. Верхняя граница реализованной нормы реакции переместилась в область высокопродуктивных классов (5,6–33,6 семян). Число семян восстановилось до среднего регионального уровня ( $23,7 \pm 1,8$ ) в 2019 г., т. е. только на 4-й год после дестабилизации.

Период восстановления генеративной сферы сосны усманской популяции оказался на год короче (см. рис. 1), чем период восстановления ступинской. В 2016 г. наметился сдвиг в направлении повышения урожайности, причем только по полнозернистости семян ( $66,0 \pm 3,5$  %). Достоверных различий между 1-м и 2-м годом дестабилизации (2015 и 2016 гг.) по данному показателю обнаружено не было. Реализованная норма признака, несмотря на некоторое смещение в область высоких значений (22,1–92,1 %), по-прежнему варьирует в широких пределах – 70 %. В последующие два года полнозернистость вышла на уровень региональной нормы:  $79,5 \pm 2,1$  (2017 г.) и  $82,7 \pm 1,3$  % (2018 г.).

В 2016 г. среднее число семян на шишку у усманской популяции, как и в Ступино, еще раз понизилось и составило  $14,5 \pm 1,2$  шт. (6,1–27,7 семян), что достоверно ниже, чем в 2013 и 2014 гг. Распределение деревьев по классам

продуктивности близко к контролю. На следующий год мода признака существенно не изменилась –  $14,0 \pm 1,2$  шт. (6,6–30,2 семян). Его величина начала повышаться на 3-й год, причем также в 2 этапа. В 2018 г. число семян достигло уровня  $19,8 \pm 1,5$  шт.; в 2019 г. – региональной нормы ( $22,5 \pm 1,1$  шт.). Следовательно, восстановление усманской популяции по 2-му признаку было на год короче по сравнению с контролем, что свидетельствует о глубине дестабилизации генетического материала.

Объяснение полученных данных дает теория стабилизирующего отбора [20] и консервативной функции полового процесса [21]. Так, по многолетним данным, пустоосемянность сосны в ЦЧР составляет около 20 %. В оптимальные годы из семенного генофонда удаляется во время эмбриогенеза большая часть генетически нарушенных, инбредных, отклоняющихся по форме и размерам генотипов. Показано, что в засуху структуры репродукции в прогамный (от опыления до оплодотворения) период развития достаточно устойчивы к погодному стрессу, а ранний эмбриогенез чувствителен к нему, что является причиной редукции биопродуктивности шишек в такие годы [28]. Развитие структур репродукции в слабо неравновесном состоянии менее упорядочено, что повышает вариабельность размерных показателей зародышей [15]. В 1-й год дестабилизации (2015 г.) уровень пустоосемянности на обоих объектах увеличился вдвое. Одним из механизмов, стабилизирующих отбор, по-видимому, является повышенная эмбриональная смертность, не позволяющая зародышам, наиболее отклоняющимся по форме и размерам, перейти от глобулярной стадии развития к внутренней дифференциации.

Гаметогенез у сосны протекает в течение двух вегетационных сезонов в шишках 1-го и 2-го годов развития. В конце 1-го вегетационного сезона гибель семяпочек в фертильной зоне шишки происходит в основном по причине недоопыленности. В начале 2-го вегетационного сезона отстающие в росте семяпочки погибают из-за летальности женских гаметофитов. В районе исследований степень редукции потенциальной семенной продуктивности в прогамный период низкая и составляет в оптимальные годы около 6 % [15]. При дестабилизации количество семян в шишках снижается в течение двух лет более чем на треть, а затем еще год сохраняется на минимальном уровне. Процесс восстановления числа семян до региональной нормы также осуществляется в два этапа. То есть морфологический эффект редукции и восстановления в обоих случаях растянут на два года. Вероятно, это объясняется тем, что в 1-й год уменьшение количества семян обусловлено повышенной гибелью семяпочек в шишках только 2-го года развития. На следующий год проявляется кумулятивный эффект дисбаланса гаметогенеза двух лет, годов опыления и оплодотворения. По этой причине восстановление биопродуктивности шишек по данному признаку также происходит в 2 этапа.

### Заключение

Проведен морфологический, биохимический и цитогенетический анализы перехода сосны обыкновенной из основного равновесного состояния в слабо неравновесное. Одной из причин переключения сосновых лесов на данный путь развития является потепление климата в ЦЧР и тепловая волна, во время которой более аридная среда перестала совпадать с биологией вида *Pinus sylvestris* L.

Индуктором перехода выступила сильная почвенная засуха 2014 г. Так как энергия прямо связана со структурой и функцией, то эффект дестабилизации в первую очередь проявился в снижении жизненного состояния популяций. При этом пострадали генеративная и вегетативная сферы деревьев одновременно. Понижилась устойчивость сосновых древостоев к вредителям, уменьшилось количество и качество семенной продукции, произошла разбалансировка биохимических процессов, увеличилось число хромосомных аномалий.

Впервые в пределах онтогенеза прослежен путь восстановления дестабилизированного семенного генофонда до региональной нормы. Показано, что у ступинской популяции сосны, произрастающей в типичных для ЦЧР условиях, данный срок составил 4 года; усманской популяции, испытывающей меньший гидрологический стресс, потребовалось 3 года. 4 оптимальных года подряд бывают в регионе редко, особенно в последние десятилетия. Произошедшая дестабилизация в зоне высокопродуктивных сосновых лесов является очень тревожным знаком.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Буторина А.К., Калаев В.Н., Миронов А.Н., Смородинова В.А., Мазурова И.Э., Дорошев С.А., Сенькевич Е.В. Цитогенетическая изменчивость в популяциях сосны обыкновенной // *Экология*. 2001. № 3. С. 216–220. Butorina A.K., Kalaev V.N., Mironov A.N., Smorodinova V.F., Mazurova I.E., Doroshev S.A., Sen'kevich E.V. Cytogenetic Variation in Populations of Scotch Pine. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2001, no. 3, pp. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011366328809>
2. Ефимов Ю.П. Семенные плантации в селекции и семеноводстве сосны обыкновенной. Воронеж: Истоки, 2010. 253 с. Efimov Yu.P. *Seed Orchards in Selection and Seed Breeding of Scots Pine*. Voronezh, Istoki Publ., 2010. 253 p.
3. Исаков Ю.Н., Авраменко Р.С., Буторина А.К., Иевлев В.В., Кузнецова Н.Ф., Мурая Л.С., Пожидаева И.М., Свицкова В.С., Соустова Н.М. Системы семенного размножения древесных растений и селекция // *Лесная генетика, селекция и физиология древесных растений*. М.: ЦНИИ лесн. генетики и селекции, 1989. С. 47–54. Isakov Yu.N., Avramenko R.S., Butorina A.K., Iyevlev V.V., Kuznetsova N.F., Muraya L.S., Pozhidayeva I.M., Svintsova V.S., Soustova N.M. Systems of Seed Reproduction of Woody Plants and Breeding. *Forest Genetics and Breeding and Physiology of Woody Plants*. Voronezh, TsNII lesnoy genetiki i selektsii Publ., 1989, pp. 47–54.
4. Калаев В.Н., Карпова С.С. Цитогенетический мониторинг: методы оценки окружающей среды и состояния генетического аппарата организма. Воронеж: ВГУ, 2004. 80 с. Kalayev V.N., Karpova S.S. *Cytogenetic Monitoring: Methods for Assessing the Environment and the State of the Organism's Genetic Apparatus*. Voronezh, VSU Publ., 2004. 80 p.
5. Калашиник Н.А. Хромосомные нарушения как индикатор оценки степени техногенного воздействия на хвойные растения // *Экология*. 2008. № 4. С. 276–286. Kalashnik N.A. Chromosome Aberrations as Indicator of Technogenic Impact on Conifer Stands. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2008, no. 4, pp. 276–286. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106741360804005X>
6. Клушевская Е.С., Кузнецова Н.Ф. Оценка устойчивости сосны обыкновенной к засухе по физиологическим характеристикам хвои // *Лесоведение*. 2016. № 3. С. 216–222. Klushevskaya E.S., Kuznetsova N.F. The Scots Pine Draught Tolerance Assessment Based on Needle Physiological Indices. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2016, no. 3, pp. 216–222.

7. Кузнецов Вл.В., Шевякова Н.И. Пролин при стрессе: биологическая роль, метаболизм, регуляция // Физиология растений. 1999. Т. 46, № 2. С. 321–336. Kuznetsov V.I.V., Shevyakova N.I. Prolone under Stress: Biological Role, Metabolism, and Regulation. *Fiziologiya rastenij* [Russian Journal of Plant Physiology], 1999, vol. 46, no. 2, pp. 321–336.
8. Кузнецова Н.Ф. Засухи в лесостепной зоне Центрально-Черноземного региона и критерии оценки их интенсивности // Изв. СГУ. Нов. сер. Сер.: Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 142–148. Kuznetsova N.F. Droughts in the Forest-Steppe Zone of Central Chernozemic Region and Criteria for Evaluation of Their Intensity. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle* [Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences], 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-142-148>
9. Кузнецова Н.Ф., Машкина О.С. Реакция на стресс и ее последствие у сосны обыкновенной в онтогенезе и при смене поколений // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. XXVIII, № 1-2. С. 83–90. Kuznetsova N.F., Mashkina O.S. Stress Reaction and It After-Effect of *Pinus sylvestris* L. in Ontogeny and at Alternation of Generations. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the Boreal Area], 2011, vol. XXVIII, no. 1-2, pp. 83–90.
10. Матвеев С.М. Климатический сигнал в радиальном приросте сосновых древостоев модальных типов леса Воронежской области // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2017. № 1. С. 99–108. Matveev S.M. The Signal of Climate in the Radial Increment of Pine Stands of the Voronezh Region. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2017, no. 1, pp. 99–108.
11. Пардаева Е.Ю., Машкина О.С., Попов В.Н. Состояние генеративной сферы *Pinus sylvestris* L. по данным цитогенетического анализа в условиях изменяющегося климата на территории Воронежской области // Сиб. экол. журн. 2017. Т. 24, № 3. С. 313–320. Pardaeva E.Y., Mashkina O.S., Popov V.N. State of *Pinus sylvestris* L. Generative Sphere According to Cytogenetic Analysis in Changing Climate Conditions in the Territory of Voronezh Oblast. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2017, vol. 24, no. 3, pp. 313–320. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20170308>
12. Переведенцев Ю.П., Гоголь Ф.В., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Глобальные и региональные изменения климата на рубеже XX и XXI столетий // Вестн. ВГУ. Сер.: География. Геоэкология. 2007. № 2. С. 5–12. Perevedentsev Yu.P., Gogol F.V., Naumov E.P., Shantalinskiy K.M. Globaland Regional Climate Changes on the Boundary of the XX th and XXI st Centuries. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2007, no. 2, pp. 5–12.
13. Работнов Т.А. Фитоценология. М.: МГУ, 1978. 384 с. Rabotnov T.A. *Phytocenology*. Moscow, MSU Publ., 1978. 384 p.
14. Рожков А.А., Козак В.Т. Устойчивость лесов. М.: Агропромиздат, 1989. 239 с. Rozhkov A.A., Kozak V.T. *Sustainability of Forests*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 239 p.
15. Свинцова В.С. Характер изменчивости признаков репродуктивной сферы *Pinus sylvestris* L. в условиях среднерусской лесостепи (Воронежская область): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 2002. 22 с. Svintsova V.S. *Variability Nature of Reproductive Traits of Pinus sylvestris* L. in Conditions of Central Russian Forest Steppe (Voronezh Region): Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 2002. 22 p.
16. Селье Г. Очерки об адаптационном синдроме. М.: Медгиз, 1960. 254 с. Sel'ye G. *Essays on the Adaptation Syndrome*. Moscow, Medgiz Publ., 1960. 254 p.
17. Серeda Л.О., Яблонских Л.А., Куролан С.А. Оценка эколого-геохимического состояния почвенного покрова городского округа город Воронеж // Вестн. ВГУ. Сер.: География. Геоэкология. 2015. № 4. С. 59–65. Sereda L.O., Yablonskikh L.A., Kurolap S.A. Assessment of Ecological and Geochemical Situation of Soil Cover in the Voronezh City. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2015, no. 4, pp. 59–65.

18. Топильская Л.А., Лучникова С.А., Чувашина Н.П. Изучение соматических и мейотических хромосом смородины на ацетогематоксилиновых давленных препаратах // Бюл. науч. информ. Центр. генет. лаб. им. И.В. Мичурина. 1975. Вып. 22. С. 58–61. Topil'skaya L.A., Luchnikova S.A., Chuvashina N.P. Study of Somatic and Meiotic Chromosomes of Currants on Acetohematoxylin Squash Preparations. *Byulleten' nauchnoy informatsii Tsentral'noy geneticheskoy laboratorii im. I.V. Michurina*, 1975, iss. 22, pp. 58–61.
19. Третьякова Е.П. Теория организации. М.: КНОРУС, 2014. 224 с. Tretyakova E.P. *Organizational Theory*. Moscow, KNORUS Publ., 2014. 224 p.
20. Шмальгаузен И.И. Факторы эволюции. Теория стабилизирующего отбора. М.: Наука, 1968. 451 с. Schmalhausen I.I. *Factors of Evolution: The Theory of Stabilizing Selection*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 451 p.
21. Щербakov В.П. Эволюция как сопротивление энтропии: II. Консервативная роль полового размножения // Журн. общей биологии. 2005. Т. 66, № 4. С. 300–309. Shcherbakov V.P. Evolution as Resistance to Entropy. II. A Conservative Role for the Sexual Reproduction. *Zhurnal obshchey biologii* [Journal of General Biology], 2005, vol. 66, no. 4, pp. 300–309.
22. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Plant and Soil*, 1973, vol. 39, pp. 205–207. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
23. Byers J.E., Cuddington K., Jones C.G., Talley T.S. Using Ecosystem Engineers to Restore Ecological Systems. *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, vol. 21, iss. 9, pp. 493–500. DOI: [10.1016/j.tree.2006.06.002](https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.06.002)
24. Dar M.I., Naikoo M.I., Rehman F., Naushin F., Khan F.A. Proline Accumulation in Plants: Roles in Stress Tolerance and Plant Development. *Osmolytes and Plant Acclimation to Changing Environment: Emerging Osmic Technologies*. New Delhi, Springer, 2016, pp. 155–166. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1_9)
25. Geras'kin S., Evseeva T., Oudalova A. Effects of Long-Term Chronic Exposure to Radionuclides in Plant Populations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, vol. 121, pp. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.03.007>
26. Grime J.P. *Plant Strategies, Vegetation Processes and Ecosystem Properties*. Chichester, Wiley, 2006. 456 p.
27. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, iss. 6160, pp. 850–853. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
28. Kuznetsova N.F. Self-Fertility in Scots Pine as a System for Regulating Close Relationships and Species Survival in an Adverse Environment. *Advances in Genetic Research*. New York, Nova Science Publishers, Inc., 2012, pp. 83–106.
29. Kuznetsova N.F., Semenov M.A., Sautkina M.Yu. Pine Forests of East European Plain: Distribution Trends, Functions and Development Problems. *Pinus: Growth, Distribution and Uses*. New York, Nova Science Publishers, Inc., 2019, pp. 1–47.
30. Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.W., Lucht W., Rahmstorf S., Schellnhuber H.J. Tipping Elements in the Earth's Climate System. *PNAS*, 2008, vol. 105, no. 6, pp. 1786–1793. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>
31. Mori A.S. Ecosystem Management Based on Natural Disturbances: Hierarchical Context and Non-Equilibrium Paradigm. *Journal of Applied Ecology*, 2011, vol. 48, iss. 2, pp. 280–292. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01956.x>

32. Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Climate Change and Wildfires in Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, vol. 6, iss. 7, pp. 683–692. DOI: <https://doi.org/10.1134/S199542551307010X>

33. Spiess R. Überlebens und Reproductions Strategien höherer Pflanzen Ergebnisse einer Literaturanalyse. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, 1989, vol. 29, no. 3, pp. 1–198.

34. Sprugel D.G. Disturbance, Equilibrium, and Environmental Variability: What is ‘Natural’ Vegetation in a Changing Environment? *Biological Conservation*, 1991, vol. 58, iss. 1, pp. 1–18. DOI: [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(91\)90041-7](https://doi.org/10.1016/0006-3207(91)90041-7)

35. Thompson I., Mackey B., McNulty S., Mosseler A. *Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change*. Technical Series No. 43. Montreal, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2009. 67 p. Available at: <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-43-en.pdf> (accessed 28.02.20).

36. Verbruggen N., Hermans C. Proline Accumulation in Plants: A Review. *Amino Acids*, 2008, vol. 35, iss. 4, pp. 753–759. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-008-0061-6>

УДК 630\*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-24-37

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ХВОЙНЫХ ПОРОД

**В.Л. Гавриков<sup>1</sup>**, д-р биол. наук, доц.; *ResearcherID*: [M-5431-2013](https://orcid.org/0000-0002-7816-0536),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-7816-0536>

**А.И. Фертиков<sup>1</sup>**, аспирант; *ResearcherID*: [AAX-2390-2020](https://orcid.org/0000-0001-8958-795X),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8958-795X>

**Р.А. Шарафутдинов<sup>1</sup>**, канд. геогр. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAW-9994-2020](https://orcid.org/0000-0002-0068-6458),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0068-6458>

**Е.А. Ваганов<sup>1,2</sup>**, д-р биол. наук, акад. РАН, проф.; *ResearcherID*: [U-2379-2019](https://orcid.org/0000-0001-9168-1152),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9168-1152>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041; e-mail: [vgavrikov@sfu-kras.ru](mailto:vgavrikov@sfu-kras.ru), [fert\\_ov@mail.ru](mailto:fert_ov@mail.ru), [ruslanate@mail.ru](mailto:ruslanate@mail.ru), [eavaganov@hotmail.com](mailto:eavaganov@hotmail.com)

<sup>2</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 01.04.20 / Принята к печати 18.06.20

---

**Аннотация.** Распределение химических элементов в годичных кольцах деревьев несет важную информацию о многих биогеохимических процессах. Для надежной интерпретации этой информации необходимо обладать сведениями о степени вариации содержания химических элементов как на уровне всего вида, так и на уровне отдельных деревьев. Цель исследования – установить, какие химические элементы имеют устойчивый характер распределения в стволах ряда хвойных пород: ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour). Данные для анализа получены на основе многолетнего опыта лесовыращивания. Экспериментальная площадка заложена в 1971–1972 гг. в окрестностях г. Красноярска Институтом леса СО РАН. Перед высадкой саженцев почвенный фон механически выровнен, и таким образом для всех посадок созданы достаточно равные условия роста. Из трех нормально развивающихся деревьев каждой породы взяты керны диаметром 12 мм, проведен их анализ современными рентгенофлуоресцентными методами. Относительные величины содержания элементов (отсчеты) получены на мультисканере Itrax Multiscanner (COX Analytical Systems). Содержание элементов в годичных кольцах характеризовалось концентрацией и запасом элементов. Концентрация рассчитывалась как количество отсчетов на 1 мм<sup>2</sup> площади кольца; запас – как количество отсчетов на всей площади кольца. Каждая из этих переменных описывалась параметрами линейного наклона в ряду календарных лет и стандартного отклонения. Кластерный анализ проводился в 4-мерном пространстве полученных параметров. Это позволило установить, группируются ли ряды распределения элементов из различных деревьев и различных пород. Три элемента (Са, Со, Р) демонстрируют высокую устойчивость параметров распределения независимо от породы дерева. Ряд других элементов (Mn, Pb, Cl, Cr, Ni, Sr, W) устойчиво группируется в зависимости от породы. Результаты исследования позволяют сконцентрироваться на изучении элементов, устойчиво распределяющихся в стволах хвойных.

**Для цитирования:** Гавриков В.Л., Фертиков А.И., Шарафутдинов Р.А., Ваганов Е.А. Изменчивость элементного состава годичных колец хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 24–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-24-37

---

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

**Финансирование:** Исследование было поддержано РФФИ, Правительством Красноярского края, Красноярским краевым фондом науки по проекту «Прогноз регионально-специфичных откликов бореальных лесов горных районов Сибири на глобальные изменения природной среды и траекторий эволюции ландшафтов для снижения экологических рисков и эффективного долгосрочного планирования деятельности различных отраслей экономики», номер гранта – 18-45-240001; и РФФИ по проекту: «Позднеголоценовая динамика бореальных лесов Азии на фоне меняющихся геохимических и климатических условий», номер гранта – 19-05-00091.

**Ключевые слова:** химические элементы дерева, древесные кольца, временной тренд, кальций, свинец, сосна обыкновенная, ель сибирская, сосна сибирская, лиственница сибирская, кластерный анализ.

## VARIABILITY IN ELEMENTAL COMPOSITION OF CONIFER TREE RINGS

**Vladimir L. Gavrikov**<sup>1</sup>, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [M-5431-2013](https://orcid.org/0000-0002-7816-0536),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7816-0536>

**Alexey I. Fertikov**<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAX-2390-2020](https://orcid.org/0000-0001-8958-795X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8958-795X>

**Ruslan A. Sharafutdinov**<sup>1</sup>, Candidate of Geography, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAW-9994-2020](https://orcid.org/0000-0002-0068-6458), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0068-6458>

**Evgenii A. Vaganov**<sup>1,2</sup>, Doctor of Biology, Academician of RAS, Prof.;

ResearcherID: [U-2379-2019](https://orcid.org/0000-0001-9168-1152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9168-1152>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, prosp. Svobodnyy, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; e-mail: [vgavrikov@sfu-kras.ru](mailto:vgavrikov@sfu-kras.ru), [fert\\_ov@mail.ru](mailto:fert_ov@mail.ru), [ruslanate@mail.ru](mailto:ruslanate@mail.ru), [eavaganov@hotmail.com](mailto:eavaganov@hotmail.com)

<sup>2</sup>Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

---

Original article / Received on April 1, 2020 / Accepted on June 18, 2020

---

**Abstract.** Distribution of chemical elements in tree rings bears important information on various biogeochemical processes. In order to achieve a reliable interpretation of the information, it is necessary to know the degree of variation in the content of chemical elements both at the level of the entire species and at the level of individual trees. The research aims to determine which chemical elements have a stable distribution in the trunks of a number of conifers: Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), and Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour). The data for the analysis were obtained on the basis of the long-term experiment in forest growing. The experimental site was laid out in 1971–1972 in the vicinity of Krasnoyarsk by the staff of the Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Before planting the seedlings, the soil ground was mechanically levelled, and thus, sufficiently equal growth conditions were created for all plantings. Cores with a diameter of 12 mm were sampled from three normally developing trees of each species and analyzed using modern X-ray fluorescence methods. Content relative values of elements (counts) were obtained with the Itrax Multiscanner (COX Analytical Systems). The content of elements in the tree rings was characterized by the concentration and reserve of elements. Concentration was calculated as the number of counts per 1 mm<sup>2</sup> of the ring area; reserve was calculated as the number of counts over the entire ring area. Each of these variables was defined by the parameters of linear slope in the calendar year series and the standard deviation. The cluster analysis was performed in the 4-dimensional space of the obtained parameters. This allowed determining whether the series of element distributions from different trees and species are grouped. Three elements (Ca, Co, and P)

---

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

show high stability of distribution parameters in tree rings with no regard to tree species. A number of other elements (Mn, Pb, Cl, Cr, Ni, Sr, and W) are stably grouped depending on the species. The results of the research enable to focus on the study of the elements stably distributed in the conifer trunks.

**For citation:** Gavrikov V.L., Fertikov A.I., Sharafutdinov R.A., Vaganov E.A. Variability in Elemental Composition of Conifer Tree Rings. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 24–37. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-24-37

**Funding:** The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), the Government of Krasnoyarsk Krai and the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the project “Forecasting the Region-Specific Responses of Boreal Forests of Mountainous Areas of Siberia to Global Changes in the Natural Environment and Trajectories of Landscape Evolution for Reduction of Environmental Risks and Effective Long-term Planning of Various Economic Sectors”, grant No. 18-45-240001; and the RFBR within the project “Late Holocene Dynamics of Asian Boreal Forests against Changing Geochemical and Climatic Conditions”, grant No. 19-05-00091.

**Keywords:** tree chemical elements, tree rings, temporal trend, calcium, lead, Scots pine, Siberian spruce, Siberian pine, Siberian larch, cluster analysis.

### *Введение*

Ствол многолетнего дерева представляет собой естественную летопись сведений о явлениях, которые оказывают значимое влияние на рост. К этим явлениям относятся как погодно-климатические колебания, так и геохимический фон подстилающих пород, ландшафтов и атмосферы в районах произрастания лесной растительности. Если 1-я группа явлений определяет в основном количественные характеристики годичных колец, т. е. скорость роста, то 2-я группа в значительной степени воздействует на качественные свойства древесных тканей.

Дендрохимическое направление исследований годичных колец активно развивается с 70–80-х гг. XX в., когда стали массово доступны эффективные методы химического анализа. Одно из направлений связано с изучением потоков основных биогенных элементов в лесных биогеоценозах [2, 3, 5]. Вместе с тем, в силу технических ограничений, не было акцента на распределение элементов в высоком разрешении (например, масштаб годичного кольца или внутрисезонные колебания).

Поскольку годичные кольца представляют собой шкалу времени, изучение их характеристик позволяет выявлять и исследовать различного рода временные аномалии в содержании химических элементов. Эти аномалии часто связываются с промышленной эмиссией [6, 7, 9, 12, 17, 23], фертилизацией почв [18], последствиями вулканической деятельности [14, 15], а также с влиянием на растения стрессовых факторов [25]. В последние годы внимание исследователей обращается на зависимость содержания химических элементов от возраста деревьев [1, 4].

Установление надежных фактов относительно того, как те или иные химические элементы распределены во временных сериях годичных колец, представляет принципиальную проблему в дендрохимических исследованиях. Рост содержания некоторых элементов (например, тяжелых металлов) кажется естественным объяснить развитием промышленности или интенсификацией транспортных потоков. Вместе с тем ряд исследований показывает, что такие

интерпретации могут быть необоснованны. Так, К.Л. Падила и К.А. Андерсон [21] установили, что содержание некоторых тяжелых металлов (Sr, Ba, Zn, Cd) показывает восходящий тренд в годовых кольцах сосны желтой (*Pinus ponderosa* Dougl. ex C.Lawson) с начала 1800-х гг., который продолжался около 50 лет. Согласно литературным данным, увеличение уровня тяжелых металлов в древесной ткани часто связывается с выпадением кислотных осадков. Однако для района исследований сведений о кислотных дождях нет, т. е. данный фактор является маловероятной причиной роста содержания указанных элементов. Ю.П. Демаков с соавторами [1] зафиксировали пик концентрации Ni в годовых кольцах сосны обыкновенной, относящийся к 1890–1909 гг., хотя никакой промышленности, связанной с Ni, в районе исследований в это время не существовало.

Временные ряды содержания элементов в годовых кольцах могут быть исследованы различными методами. В частности, в ряде работ [1, 13, 22, 26] применялся кластерный анализ, который является классическим методом разведочного анализа. Основная цель использования этого метода – упорядочение большого числа объектов-наблюдений, каждое из которых описывается множеством параметров. В дендрохимии такими объектами-наблюдениями могут быть временные ряды содержания химических элементов.

В работах [26] и [22] по лиственнице сибирской (*Larix gmelinii* Rupr.) выделялись кластеры элементов по особенностям их динамики в хронологиях колец. Среди обозначенных кластеров важно отметить группы биологически важных элементов (типичные представители – К и Р), а также щелочноземельных металлов (Ca, Mg, Sr, Ba). 1-я группа, как правило, характеризуется увеличением содержания элементов от сердцевины ствола к его периферии, в то время как 2-я – уменьшением их содержания в более молодых кольцах.

Цель исследования – установление групп элементов, которые имеют сходную форму изменчивости в сериях годовых колец, и степени видоспецифичности изменчивости содержания элементов в годовых кольцах различных древесных пород.

#### *Объекты и методы исследования*

*Долговременный эксперимент по лесовыращиванию.* В 1971–1972 гг. группа лесных почвоведов Института леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР заложила долговременный эксперимент для исследования воздействия различных древесных пород на формирование почвенного покрова [8, 20, 24]. На площади 1,5 га верхний 50-сантиметровый слой почвы был удален, гомогенизирован и равномерно распределен, чтобы уравнивать условия роста. На подготовленную территорию высадили с плотностью 0,5×0,5 м 2–3-летние саженцы нескольких древесных пород. Чистое насаждение каждой породы занимало 2400 м<sup>2</sup>. Площадь эксперимента расположена приблизительно в 50 км к северо-западу от г. Красноярск, ее координаты N 56°12'8,49" E 92°20'48,97" (рис. 1).

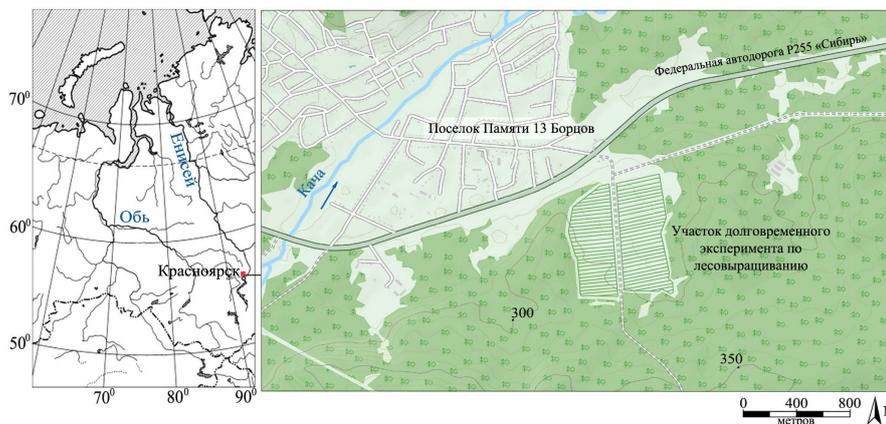


Рис. 1. Географическое расположение долговременного эксперимента (положение на карте России отмечено красным квадратом)

Fig. 1. Geographical location and situation plan of the study area. A red square on the left is the geographical position of the study area

Отборы проб проводились в древостоях 4 широко распространенных хвойных видов: ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour).

*Отбор проб и определение содержания элементов.* После окончания сезонного роста 2017 г. по 3 внешне здоровых дерева каждой породы были случайным образом отобраны для взятия проб. С помощью бурава Haglöf на высоте груди извлечены керны диаметром 12 мм. В дальнейшем керны высушивались до воздушно-сухого состояния, и с помощью циркулярной пилы из них перпендикулярно волокнам выпиливались планки толщиной 2 мм. Планки сканировались с помощью установки Itrax Multiscanner (COX Analytical Systems) в сочетании с программным комплексом Multi Scanner Navigator. Ширина луча сканирования составляла 2 мм, а расстояние между точками измерений (пространственное разрешение) – 100 мкм.

Результатом сканирования образцов в мультисканере являются так называемые отсчеты (counts). Они представляют собой относительные показатели, пропорциональные количеству фотонов, испускаемых атомами определенных химических элементов. Иными словами, отсчеты пропорциональны количеству атомов выбранного химического элемента и отражают его содержание в сканируемых образцах древесины. В настоящем исследовании рассматривался следующий набор химических элементов: P, S, Cl, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, W, Pb.

Параллельно с определением количества отсчетов мультисканер осуществляет измерение рентгеновской плотности образца древесины. Рентгеновские снимки использовались для установления границ между годовыми кольцами, при этом резкое падение рентгеновской плотности считалось внешней границей кольца.

*Статистическая обработка данных.* Предварительная подготовка данных состояла в том, что все отсчеты в пределах одного годового кольца суммировались, что должно отражать содержание какого-либо элемента в конкретном кольце. Отсчеты представляют собой относительный показатель, поэтому имеет смысл не его значение в отдельном кольце, а сравнение количества отсчетов в серии годовых колец, т. е. рассмотрение серии показателя как временного ряда.

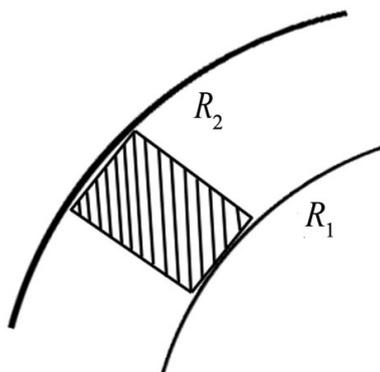
Для описания содержания элементов в годичных кольцах использовались две базовые переменные: концентрация отсчетов в полосе сканирования и запас отсчетов в полном годичном кольце. Под концентрацией отсчетов понимается плотность отсчетов на единицу площади ( $\text{мм}^2$ ) в полосе сканирования. Под запасом отсчетов – общее количество отсчетов в полном годичном кольце, показатель оценивался в предположении, что границы колец представляют собой правильные окружности.

На рис. 2 представлена схема вычисления концентрации и запаса отсчетов. Заштрихованная область обозначает фрагмент полосы сканирования, приходящийся на данное годичное кольцо. Площадь фрагмента – площадь прямоугольника с шириной 2 мм и длиной, равной разнице между радиусами соседних колец ( $R_2 - R_1$ ). Количество отсчетов на  $1 \text{ мм}^2$  этого прямоугольника – концентрация отсчетов. Запас отсчетов – оценка общего количества отсчетов на площади полного кольца в предположении, что соседние кольца – правильные окружности с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ .

Очевидно, что 2 переменные, концентрация и запас, имеют следующие отличия. Концентрация не зависит от скорости роста, т. к. является относительной величиной и рассчитывается на единицу площади. Запас в значительной степени зависит от скорости роста и при постоянной концентрации пропорционален площади годичного кольца.

Рис. 2. Схема вычисления концентрации и запаса отсчетов

Fig. 2. Scheme for calculating the concentration and reserves of counts



Обе переменные, вычисленные для каждого годичного кольца, представляют собой временные ряды, которые должны быть охарактеризованы количественными параметрами. Каждый временной ряд описывался двумя простыми и наглядными параметрами: временным линейным трендом и стандартным отклонением. Линейный тренд является показателем роста среднего значения ряда в более молодых кольцах: остаются ли они приблизительно одинаковыми или уменьшаются. Стандартное (среднеквадратическое) отклонение оценивает степень варьирования значений ряда относительно среднего значения.

Таким образом, изменчивость каждого элемента в ряду годичных колец характеризовалась 4 параметрами отсчетов: стандартным отклонением запасов, линейным трендом запасов, стандартным отклонением концентраций, линейным трендом концентраций. Иными словами, последующий анализ проводился в 4-мерном пространстве указанных параметров.

Вместе с тем, имея в виду особенность методов многомерной классификации, для получения неискаженного результата исходные данные должны быть преобразованы. Суть метода состоит в оценивании расстояний между объектами в многомерном пространстве. На основании этих расстояний и формируются группы (кластеры). Отсюда следует, численно большие параметры станут более значимыми в процессе кластеризации и в ходе анализа в целом, подавят влияние других параметров – конечные данные будут неверными. Например, количество отсчетов для  $S_a$  всегда на порядок больше, чем для  $N_i$ . Значения параметров необходимо трансформировать так, чтобы они были численно сравнимы друг с другом.

Трансформация данных осуществляется в 2 этапа. Во-первых, исходные данные (концентрация и запас) нормируются на собственные максимумы. Это приводит к тому, что абсолютно все значения оказываются между 0 и 1. На основе полученных результатов вычисляются наклоны и стандартные отклонения. Во-вторых, полученные значения наклонов и стандартных отклонений стандартизируются, т. к. стандартные отклонения всегда численно гораздо больше, чем наклоны, и первые получают слишком большой вес при анализе. Стандартизация приводит к тому, что среднее набора данных становится равным 0, а среднеквадратическое отклонение – 1.

В таком образом трансформированном виде исходные данные подвергались кластерному анализу в 4-мерном пространстве указанных параметров. Процедура анализа следовала предложению И.П. Панюшкиной с соавторами [22]. На 1-м этапе строится древовидная диаграмма, которая позволяет предположить, сколько кластеров будет сформировано из имеющихся данных. Установлено, что оптимальное количество кластеров для полученного нами материала – 4. В дальнейшем используется метод Уорда с оценкой расстояний как  $1 - r$ , где  $r$  – коэффициент корреляции Пирсона.

В ходе анализа каждый элемент в одиночном дереве считался отдельным независимым наблюдением, т. е. в анализе участвовало 192 наблюдения (16 элементов в 12 деревьях). Они маркировались таким образом, чтобы однозначно идентифицироваться с элементом, породой и номером дерева. Например,  $Sa-sr3$  читается как «кальций в ели, дерево № 3». Породы имели следующие обозначения:  $sc$ ,  $sp$ ,  $l$ ,  $ps$  для сосны обыкновенной, ели сибирской, лиственницы сибирской и сосны сибирской соответственно.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

При использовании кластерного анализа существенное значение имеет выбор набора параметров, формирующих многомерное пространство для проведения классификации. Простые и наглядные параметры позволяют в дальнейшем осуществить ясную интерпретацию полученных данных. В частности, высказать предположения о распределении наблюдений по заданным кластерам. Ниже будут рассмотрены 3 аспекта результатов кластеризации: видоспецифичность распределения элементов, а также содержание  $Sa$  и  $Pb$  как важных представителей биогенных и антропогенных агентов.

*Видоспецифичность распределения элементов в стволах деревьев.*  
В таблице сведены результаты группировки наблюдений по 4 кластерам.

**Распределение элементов по кластерам**

| № кластера                           | Элемент в дереве   |
|--------------------------------------|--|
| 1                                    | <b>Ca-sc1, Ca-sc3, Ca-sp1, Ca-sp2, Ca-sp3, Ca-l1, Ca-l2, Ca-l3, Ca-ps1, Ca-ps2</b>         |
|                                      | <b>Co-sc1, Co-sc2, Co-sc3, Co-sp1, Co-sp2, Co-sp3, Co-l1, Co-l2, Co-l3, Co-ps1, Co-ps2</b> |
|                                      | Cl-l3, Cl-ps1; K-l1, K-l3  |
|                                      | <i>Mn-sc1, Mn-sc2, Mn-sc3, Mn-l1, Mn-l2</i>  |
|                                      | <b><i>Pb-sc1, Pb-sc2, Pb-sc3, Pb-sp1, Pb-sp2, Pb-sp3</i></b>                               |
|                                      | Zn-sp3, Zn-ps2   |
| 2                                    | Cl-l1, Cl-ps2  |
|                                      | Cr-sc1, <b><i>Cr-sp1, Cr-sp2, Cr-sp3</i></b> , Cr-l1, Cr-ps2                               |
|                                      | Cu-sc1, Cu-sp1, Cu-sp3, Cu-l1, Cu-ps1, Cu-ps2  |
|                                      | Fe-sc1, Fe-sp3, Fe-l1, Fe-ps2; K-sc1, K-sp2, K-sp3, K-ps2                                  |
|                                      | <b><i>Mn-sp1, Mn-sp2, Mn-sp3</i></b> , Mn-ps2  |
|                                      | Ni-sc1, <b><i>Ni-sp1, Ni-sp2, Ni-sp3</i></b> , Ni-l1, Ni-ps2                               |
|                                      | S-sc1, S-sp1, S-sp3, S-l1, S-ps2   |
|                                      | Sr-sc1, <b><i>Sr-sp1, Sr-sp2, Sr-sp3</i></b> , Sr-l1, Sr-ps2                               |
|                                      | V-sc1, <b><i>V-sp1, V-sp2, V-sp3</i></b> , V-l1, V-ps2                                     |
|                                      | W-sc1, <b><i>W-sp1, W-sp2, W-sp3</i></b> , W-l1, W-ps2                                     |
| Zn-sc1, Zn-sp1, Zn-sp2, Zn-l1        |  |
| 3                                    | <b><i>Cl-sc1, Cl-sc2, Cl-sc3, Cl-sp1, Cl-sp2, Cl-sp3</i></b> , Cl-ps3                      |
|                                      | Co-ps3; Cr-l2; Fe-sc3, Fe-sp2, Fe-l2, Fe-ps3   |
|                                      | K-l2, K-ps1, K-ps3   |
|                                      | <b><i>Pb-l1, Pb-l2, Pb-l3, Pb-ps1, Pb-ps2, Pb-ps3</i></b>                                  |
|                                      | <b>P-sc1, P-sc2, P-sc3, P-sp1, P-sp2, P-sp3, P-l1, P-l2, P-l3, P-ps2, P-ps3</b>            |
|                                      | S-ps3; Sr-sc2, Sr-l2, Sr-ps3; Zn-ps3   |
| 4                                    | Ca-sc2, Ca-ps3; Cl-l2  |
|                                      | Cr-sc2, Cr-sc3, Cr-l3, Cr-ps1, Cr-ps3  |
|                                      | Cu-sc2, Cu-sc3, Cu-sp2, Cu-l2, Cu-l3, Cu-ps3   |
|                                      | Fe-sc2, Fe-sp1, Fe-l3, Fe-ps1; K-sc2, K-sc3, K-sp1   |
|                                      | Mn-l3, Mn-ps1, Mn-ps3  |
|                                      | Ni-sc2, Ni-sc3, Ni-l2, Ni-l3, Ni-ps1, Ni-ps3; P-ps1  |
|                                      | S-sc2, S-sc3, S-sp2, S-l2, S-l3, S-ps1   |
|                                      | Sr-sc3, Sr-l3, Sr-ps1  |
|                                      | V-sc2, V-sc3, V-l2, V-l3, V-ps1, V-ps3   |
|                                      | W-sc2, W-sc3, W-l2, W-l3, W-ps1, W-ps3   |
| Zn-sc2, Zn-sc3, Zn-l2, Zn-l3, Zn-ps1 |  |

Примечание: Полу жирным отмечены элементы с высокой кросс-видовой кластеризацией; полу жирным курсивом – с устойчивой внутривидовой кластеризацией.

Как видно из данных, некоторые элементы демонстрируют высокую степень концентрации в одном кластере независимо от породы дерева. К ним относятся: Са (10 из 12 наблюдений попадают в один кластер), Со (11 из 12 наблюдений) и Р (11 из 12). Наибольший интерес представляют важные биогенные элементы, Са и Р, которые отнесены по результатам анализа в кластеры № 1 и 3 соответственно.

Кластер № 1 характеризуется тем, что как запасы элементов, так и их концентрации уменьшаются от сердцевины ствола к его периферии (линейные тренды имеют отрицательный наклон). Кроме того, вариабельность и запасов, и концентраций выше средней. В кластере № 3 запасы и концентрации, напротив, растут от сердцевины ствола к периферии. При этом вариабельность концентраций выше средней, а запасов – около среднего значения.

Распределение ряда других элементов показывает известную привязку к породе дерева, по меньшей мере в рамках вида. Так, Мп, Рb и Сl в древесине сосны обыкновенной группируются всегда в одном и том же кластере (Мп и Рb – в кластере № 1, Сl – в кластере № 3). Аналогично ведут себя Рb, Сr, Мп, Ni, Sr, V, W и Сl в ели, Рb в лиственнице, Рb в сосне сибирской.

В работах, выполненных с применением кластерного анализа [1, 13, 22, 26], исходный материал, как правило, касался одного вида деревьев. В настоящем исследовании благодаря закладке долговременного эксперимента получены данные по нескольким видам, что позволяет поставить вопрос о видоспецифичности распределения химических элементов в стволах деревьев.

На основе представленных в таблице данных можно сделать вывод, что для некоторых элементов (Са, Со, Р) весьма вероятно отсутствие какой-либо видоспецифичности, поскольку почти все наблюдения по этим элементам группируются в одном и том же кластере. Вместе с тем в распределении Рb, Сr, Мп, Ni, Sr, V, W и Сl вероятно ожидать видоспецифичности. Иными словами, характер их распределения в стволах может быть связан с видовой природой породы.

*Распределение Са.* Са является важным биогенным элементом, задействованным во множестве физиологических процессов [19]. Из полученных данных следует, что в большинстве случаев содержание Са уменьшается от сердцевины ствола к его периферии. Даже отдельные наблюдения, не попавшие в кластер № 1 (сосна обыкновенная № 2 и сосна сибирская № 3), тем не менее в целом демонстрируют нисходящий тренд (рис. 3). Можно заключить, распределение Са в стволах деревьев, по меньшей мере хвойных, подчиняется указанной закономерности.

Причина этого феномена пока не нашла удовлетворительного объяснения. Т.В. Бергер с соавторами [10] изучали круговорот Са и его содержание в стволах ели обыкновенной в чистых и смешанных насаждениях. Одна из рассмотренных учеными причин уменьшения содержания Са от сердцевины ствола к периферии состояла в возможной связи между депонированием Са и скоростью роста. Предположительно, при высокой скорости роста Са «разбавляется» прирастающей древесиной.

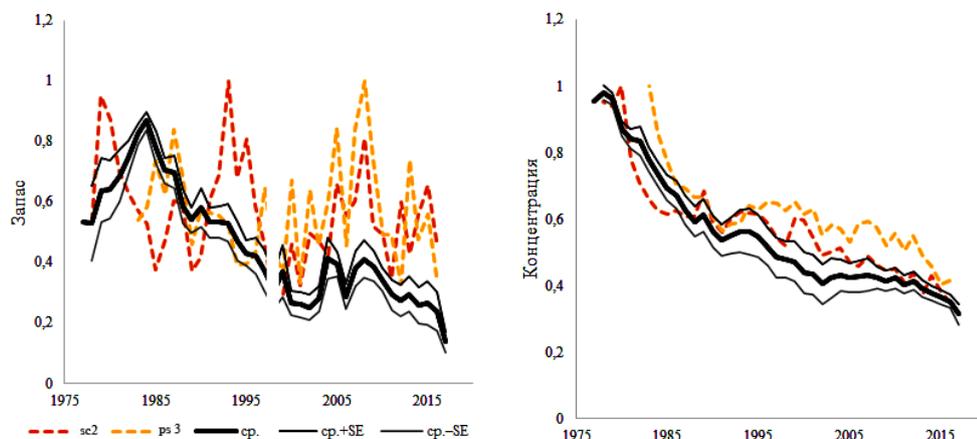


Рис. 3. Распределение запасов (слева) и концентраций (справа) Ca в годичных кольцах пород: ср. – среднее значение по деревьям кластера № 1; SE – стандартная ошибка среднего

Fig. 3. Distribution of reserves (left) and concentrations (right) of Ca in tree rings of studied species: ср. – mean value for trees in cluster no. 1; SE – standard error of mean

На рис. 4 приведено соотношение площади годичного кольца (как оценки скорости роста) и концентрации отсчетов по Ca в стволе ели № 3. Представленные данные свидетельствуют о том, что однозначной отрицательной связи между этими показателями не наблюдается. Можно ожидать положительной связи концентрации Ca в годичных кольцах ели и более высокой скорости роста.

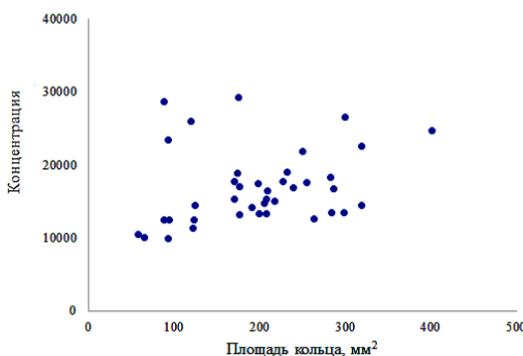


Рис. 4. Соотношение площади кольца и концентрации Ca в годичных кольцах ели № 3

Fig. 4. Relationship of ring area and Ca concentration in tree rings of spruce no. 3

*Распределение Pb.* Свинец принадлежит к группе тяжелых металлов которые являются типичными антропогенными загрязнителями. Основные источники этих поллютантов – транспорт и промышленные предприятия [16]. Вопрос, насколько методы дендрохимии применимы для мониторинга загрязнения среды свинцом, представляет существенный интерес ввиду доступности элементного анализа и широкого распространения зеленых насаждений.

Данные, полученные в ходе исследования, свидетельствуют о том, что распределение свинца в сериях годичных колец может зависеть от породы дерева (см. таблицу). В частности, для сосны обыкновенной и ели характерно снижение содержания свинца, в то время как содержание свинца в стволах лиственницы и сосны сибирской увеличивается от сердцевины к периферии (рис. 5).

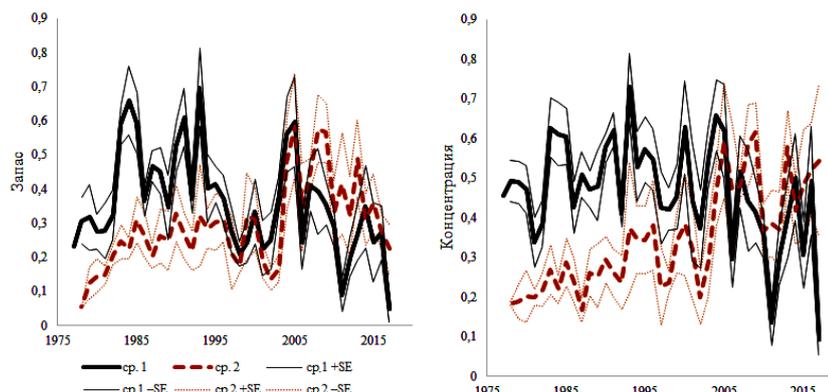


Рис. 5. Распределение запасов (слева) и концентраций (справа) Pb в годичных кольцах исследованных пород: cp. 1 и cp. 2 – средние значения для деревьев из кластера № 1 и № 2 соответственно

Fig. 5. Distribution of reserves (left) and concentrations (right) of Pb in tree rings of the studied species: cp. 1 and cp. 2 – mean values for trees in clusters no. 1 and no. 2, respectively

Важно отметить, что нарастание количества свинца в годичных кольцах не может быть объяснено усилением загрязнения окружающей среды этим элементом, т. к. исследованные древостои находятся в непосредственной близости друг от друга. Если за свинцовым загрязнением предполагается следить посредством анализа годичных колец, то для сравнимости результатов методика должна подразумевать изучение одной и той же породы дерева. Ранее Р. Биндлер с соавторами [11] пришли к выводу, что использование годичных колец сосны в целях мониторинга свинцового загрязнения (в основном атмосферного происхождения) весьма затруднительно, т. к. деревья значительную часть свинца поглощают из глубоких горизонтов почвы.

### Заключение

Содержание химических элементов в годичных кольцах хвойных деревьев характеризуется существенной вариабельностью. Закономерности распределения элементов могут быть изучены с помощью методов многомерной классификации, таких как кластерный анализ.

Привлечение в настоящем исследовании материалов многолетнего многовидового эксперимента позволяет значительно расширить представления о распределении различных химических элементов в стволах хвойных деревьев. В подобных исследованиях часто наблюдается значительная вариабельность результатов. Особенно важно установить по крайней мере некоторые устойчивые факты, а также задействовать более широкий спектр видов, что поможет сконцентрироваться на отдельных надежных направлениях исследований и избежать неверных интерпретаций в силу разнообразности наблюдаемых в стволах процессов.

В ходе изучения изменчивости содержания элементов в годичных кольцах был установлен ряд потенциально перспективных закономерностей. Два важнейших биогенных макроэлемента, Са и Р, демонстрируют существенную

устойчивость распределения в стволах рассмотренных хвойных пород независимо от породы и индивидуального дерева. Как правило, содержание Са падает от центра ствола к периферии, а содержание Р – растет.

Изменчивость ряда важных элементов – Mn, Cl и в особенности Pb – по-видимому, связана с фактором вида. Эта связь выражается в том, что данные, относящиеся к виду (деревьям одной породы), часто концентрируются в одном и том же кластере, т. е. обладают схожими характеристиками распределения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Демаков Ю.П., Швецов С.М., Таланцев В.И., Калинин К.К. Динамика содержания зольных элементов в годичных слоях старовозрастных сосен, произрастающих в пойменных биотопах // Вестн. МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 25–35. Demakov Yu.P., Shvetsov S.M., Talantsev V.I., Kalinin K.K. Dynamics of Ash Constituents Content in Annual Rings of Old-Growth Pines Growing at the Floodplain Biotopes. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2011, no. 3, pp. 25–35.

2. Казимиров Н.И., Волков А.Д., Зябченко С.С., Иванчиков А.А., Морозова Р.М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 302 с. Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zybchenko S.S., Ivanchikov A.A., Morozova R.M. *Exchange of Matter and Energy in Pine Forests of European North*. Leningrad, Nauka Publ., 1977. 302 p.

3. Казимиров Н.И., Морозова Р.М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука. 1973. 176 с. Kazimirov N.I., Morozova R.M. *Biological Cycle of Substances in Spruce Forests of Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1973. 176 p.

4. Медведев И.Ф., Деревягин С.С., Козаченко М.А., Гусакова Н.Н. Оценка содержания химических элементов в древесине различных пород деревьев // Аграр. науч. журн. 2015. № 11. С. 12–14. Medvedev I.F., Derevyagin S.S., Kozachenko M.A., Gusakova N.N. Estimation of Chemical Elements Content in the Various Trees Wood. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [The Agrarian Scientific Journal], 2015, no. 11, pp. 12–14.

5. Осипов А.Ф., Манова С.О., Бобкова К.С. Запасы и элементный состав растений почвенного покрова в среднетаежных сосняках послепожарного происхождения (Республика Коми) // Растит. ресурсы. 2014. Т. 50, вып. 1. С. 3–11. Osipov A.F., Manova S.O., Bobkova K.S. Reserves and Element Composition in Ground Cover Plants in the Pine Forests of Post-Fire Origin (The Komi Republic). *Rastitelnye Resursy*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 3–11.

6. Хантемиров Р.М. Биоиндикация загрязнения среды в прошлом на основе анализа содержания химических элементов в годичных слоях древесины // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1996. Т. 16. С. 153–164. Hantemirov R.M. Bioindication of Environmental Pollution History through Tree Rings Chemical Analysis. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 1996, vol. 16, pp. 153–164.

7. Четвериков А.Ф. Химический состав годичных слоев прироста деревьев и условия природной среды // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 126–130. Chetverikov A.F. Chemical Composition of Annual Layers of Tree Growth and Environmental Conditions. *Dendrochronology and Dendroclimatology*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. pp. 126–130.

8. Шугалей Л.С., Семечкина М.Г., Яшихин Г.И., Дмитриенко В.К. Моделирование развития искусственных лесных биогеоценозов. Новосибирск: Наука, 1984. 152 с. Shugaley L.S., Semechkina M.G., Yashikhin G.I., Dmitriyenko V.K. Modeling the Development of Artificial Forest Biogeocenoses. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 152 p.
9. Baes C.F., McLaughlin S.B. Trace Elements in Tree Rings: Evidence of Recent and Historical Air Pollution. *Science*, 1984, vol. 224, iss. 4648, pp. 494–497. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.224.4648.494>
10. Berger T.W., Köllensperger G., Wimmer R. Plant-Soil Feedback in Spruce (*Picea abies*) and Mixed Spruce-Beech (*Fagus sylvatica*) Stands as Indicated by Dendrochemistry. *Plant and Soil*, 2004, vol. 264, no. 1-2, pp. 69–83. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047714.43253.25>
11. Bindler R., Renberg I., Klaminder J., Emteryd O. Tree Rings as Pb Pollution Archives? A Comparison of  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  Isotope Ratios in Pine and Other Environmental Media. *Science of The Total Environment*, 2004, vol. 319, iss. 1-3, pp. 173–183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00397-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00397-8)
12. Bondietti E.A., Baes III C.F., McLaughlin S.B. Radial Trends in Cation Ratios in Tree Rings as Indicators of the Impact of Atmospheric Deposition on Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, vol. 19(5), pp. 586–594. DOI: <https://doi.org/10.1139/x89-092>
13. Goldberg E.L., Zolotarev K.B., Maksimovskaya V.V., Kondratyev V.I., Ovchinnikov D.V., Naurzbaev M.M. Correlations and Fixation of Some Elements in Tree Rings. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, vol. 575, iss. 1-2, pp. 196–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.01.066>
14. Hall G.S., Yamaguchi D.K., Rettberg T.M. Multielemental Analyses of Tree Rings by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1990, vol. 146, pp. 255–265. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02164193>
15. Hevia A., Sánchez-Salguero R., Camarero J.J., Buras A., Sangüesa-Barreda G., Galván J.D., Gutiérrez E. Towards a Better Understanding of Long-Term Wood-Chemistry Variations in Old-Growth Forests: A Case Study on Ancient *Pinus uncinata* Trees from the Pyrenees. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 625, pp. 220–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.229>
16. Hou S., Zheng N., Tang L., Ji X., Li Y., Hua X. Pollution Characteristics, Sources, and Health Risk Assessment of Human Exposure to Cu, Zn, Cd and Pb Pollution in Urban Street Dust across China between 2009 and 2018. *Environment International*, 2019, vol. 128, pp. 430–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.046>
17. Liu Y., Ta W.Y., Bao T.Y., Yang Z.Y., Song H.M., Liu N., Wang W.P., Zhang H.Y., Zhang W., An Z.S. Trace Elements in Tree Rings and Their Environmental Effects: A Case Study in Xi'an City. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, vol. 52, pp. 504–510. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0048-5>
18. McClenahan J.R., Vimmerstedt J.P., Scherzer A.J. Elemental Concentrations in Tree Rings by PIXE: Statistical Variability, Mobility, and Effects of Altered Soil Chemistry. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, vol. 19, no. 7, pp. 880–888. DOI: <https://doi.org/10.1139/x89-134>
19. McLaughlin S.B., Wimmer R. Calcium Physiology and Terrestrial Ecosystem Processes. *New Phytologist*, 1999, vol. 142, iss. 3, pp. 373–417. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00420.x>

20. Menyailo O.V., Hungate B.A., Zech W. Tree Species Mediated Soil Chemical Changes in a Siberian Artificial Afforestation Experiment. *Plant and Soil*, 2002, vol. 242, iss. 2, pp. 171–182. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016290802518>

21. Padilla K.L., Anderson K.A. Trace Element Concentration in Tree-Rings Biomonitoring Centuries of Environmental Change. *Chemosphere*, 2002, vol. 49, iss. 6, pp. 575–585. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00402-2)

22. Panyushkina I.P., Shishov V.V., Grachev A.M., Knorre A.A., Kirdyanov A.V., Leavitt S.W., Vaganov E.A., Chebykin E.P., Zhuchenko N.A., Hughes M.K. Trends in Elemental Concentrations of Tree Rings from the Siberian Arctic. *Tree-Ring Research*, 2016, vol. 72, no. 2, pp. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.3959/1536-1098-72.02.67>

23. Prohaska T., Stadlbauer C., Wimmer R., Stinger G., Latkoczy C., Hoffmann E., Stephanowitz H. Investigation of Element Variability in Tree Rings of Young Norway Spruce by Laser-Ablation-ICPMS. *The Science of the Total Environment*, 1998, vol. 219, iss. 1, pp. 29–39.

24. Schugalei L.S. The Siberian Afforestation Experiment: History, Methodology, and Problems. Ed. by D. Binkley, O. Menyailo. *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*. Springer, Dordrecht, 2005, pp. 257–268. DOI: [https://doi.org/10.1007/1-4020-3447-4\\_15](https://doi.org/10.1007/1-4020-3447-4_15)

25. Selin E., Standzenieks P., Boman J., Teeyasoontranont V. Multi-Element Analysis of Tree Rings by EDXRF Spectrometry. *X-Ray Spectrometry*, 1993, vol. 22, iss. 4, pp. 281–285. DOI: <https://doi.org/10.1002/xrs.1300220420>

26. Vaganov E.A., Grachev A.M., Shishov V.V., Panyushkina I.P., Leavitt S.W., Knorre A.A., Chebykin E.P., Menyailo O.V. Elemental Composition of Tree Rings: A New Perspective in Biogeochemistry. *Doklady Biological Sciences*, 2013, vol. 453, pp. 375–379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012496613060203>

УДК 630\*232.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-38-55

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕСНОЙ СЕЛЕКЦИИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ТРЕНД ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ

*А.П. Царев<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>*

*Н.В. Лаур<sup>2</sup>, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0000-0003-1989-0384)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-0384>*

*В.А. Царев<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>*

*Р.П. Царева<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>*

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: antsa-55@yandex.ru, vad.tsareff@yandex.ru, tsarais42@mail.ru

<sup>2</sup>Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: laur@petsu.ru

---

Обзорная статья / Поступила в редакцию 07.04.20 / Принята к печати 13.06.20

---

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию тенденций, существующих в лесной селекции России в последнее время, сравнению их с аналогичными достижениями в зарубежных странах с близкими климатическими условиями и оценке, на основании полученных результатов, перспективы развития этого научно-производственного направления в нашей стране. Используются официальные материалы государственных инвентаризаций за последние 25 лет и отечественные научные публикации, а также ряд зарубежных источников. Исследованы количественные показатели отбора плюсовых деревьев; создания архивов клонов, географических культур и популяционно-экологических культур; выделения генетических резерватов и плюсовых насаждений; организации временных и постоянных лесосеменных участков; закладки маточных и лесосеменных плантаций и испытательных культур плюсовых деревьев. Материалы по развитию или деградации лесных генетических ресурсов в России анализировали по годам. Установлено, что в стране идет регресс государственного лесного генетико-селекционного комплекса. За 25 лет произошло снижение в среднем на 50 % с колебаниями по отдельным показателям 7...940 %. Сравнение развития лесного единого генетико-селекционного комплекса в нашей стране с его развитием в зарубежных странах (Канада, Норвегия, Швеция, Финляндия) выявило наше отставание почти по всем показателям в несколько раз. В частности, интенсивность отбора плюсовых деревьев в странах Северной Европы (Норвегия, Швеция, Финляндия) выше, чем в России, в 21,0–61,7 раза. Обеспеченность лесосеменными плантациями в РФ в 2,7–12,0 раз ниже по сравнению с Норвегией и Финляндией. При этом в северных странах высокую долю составляют лесосеменные плантации более прогрессивного – второго порядка. Например, в Канаде их более 30 %. В РФ такие плантации практически отсутствуют и в официальных документах не числятся. Анализ показал, что настало время разработать новую долгосрочную программу генетико-селекционного улучшения лесных древесных пород для сохранения устойчивого лесовосстановления российских лесов и их ценного генофонда, а также определить ответственных за ее выполнение.

**Для цитирования:** Царев А.П., Лаур Н.В., Царев В.А., Царева Р.П. Современное состояние лесной селекции в Российской Федерации: тренд последних десятилетий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 38–55. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-38-55

**Благодарность:** Авторы благодарят коллег Дж. Ричардсона (Канада), Г. Блэкберна (Канада), Ю. Кузовкину (США), Р. Залесны (США) и Н. Рыжкову (Карелия, Россия) за помощь в поиске информации о лесных генетических ресурсах в зарубежных источниках.

**Ключевые слова:** лесная селекция, плюсовые деревья, лесосеменные плантации, испытательные культуры, географические культуры, генетические резерваты.

## THE CURRENT STATE OF FOREST BREEDING IN THE RUSSIAN FEDERATION: THE TREND OF RECENT DECADES

*Anatoly P. Tsarev*<sup>1</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

*Natalya V. Laur*<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0000-0003-1989-0384),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-0384>

*Vadim A. Tsarev*<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

*Raisa P. Tsareva*<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: antsa-55@yandex.ru, vad.tsareff@yandex.ru, tsarais42@mail.ru

<sup>2</sup>Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: laur@petsru.ru

---

Review article / Received on April 7, 2020 / Accepted on June 13, 2020

---

**Abstract.** The work is devoted to the study of the trends existing in forest breeding in Russia over the recent years, their comparison with similar achievements in foreign countries with close climatic conditions, and the assessment of the prospects for the development of this scientific and production direction in our country, based on the obtained results. The official data of State inventories over the last 25 years and national scientific publications were used. A number of foreign literature sources were also considered for comparison in addition to Russian sources. Quantitative indices of the following processes were studied: selection of plus trees; creation of clone archives, provenance trial and population-ecological plantations; allocation of forest genetic reserves and plus stands; organization of temporary and permanent forest seed plots; and creation of mother plantations, forest seed orchards and progeny field tests of plus trees. Materials on the development or degradation of forest genetic resources in Russia were analyzed by years. The analysis has shown that in Russia there is a regression of the state forest genetic and breeding complex. Over the past 25 years, there has been an average 50 % decline in individual components, with fluctuations in various indices ranging from 7 to 940 %. A comparison of the development of the unified forest genetic complex in our country with its development in a number of foreign countries (Canada, Norway, Sweden, and Finland) revealed our lag in almost all indices by several times. In particular, the selection intensity of plus trees in the countries of Northern Europe (Norway, Sweden, and Finland) is 21.0–61.7 times higher than in Russia. The provision with forest seed orchards in the Russian Federation is 2.7–12.0 times lower than in Norway and Finland. At the same time forest seed orchards of the more progressive, second order represent a large share in the

Nordic countries. For instance, in Canada there are more than 30 % of them. In the Russian Federation, such plantations are practically absent and are not listed in official documents. The analysis has shown that it is time to develop a new long-term program of genetic and breeding improvement of forest tree species in order to preserve sustainable reforestation of Russian forests and their valuable gene pool, as well as to identify those responsible for its implementation.

**For citation:** Tsarev A.P., Laur N.V., Tsarev V.A., Tsareva R.P. The Current State of Forest Breeding in the Russian Federation: The Trend of Recent Decades. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 38–55. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-38-55

**Acknowledgements:** The authors are grateful to colleagues Jim Richardson (Canada), Gwylim Blackburn (Canada), Julia Kuzovkina (USA), Ronald Zalesny (USA) and Nina Ryzhkova (Karelia, Russia) for help in finding information on forest genetic resources in foreign literature sources.

**Keywords:** forest breeding, plus trees, forest seed orchards, progeny field tests, provenance trial plantations, forest genetic reserves.

Лесная селекция является развивающейся наукой и производственным направлением. Цель лесной селекции – сохранение и рациональное использование ценного генофонда лесных древесных растений при эксплуатации лесов. В XX в. во многих странах, включая Россию, развитие лесной селекции из отдельных опытных работ региональных организаций превратилось в государственно важную предпосылку устойчивого развития экономики.

Аспекты генетики и селекции лесных древесных пород изучены в разных регионах России. В Московской области известны пионерные работы А.С. Яблокова [58], Л.Ф. Правдина [36], Е.П. Проказина [37], С.П. Иванникова [17], А.Я. Любавской [30] и др.; в Ленинградской области – А.П. Тольского [45], П.Л. Богданова [5] и др.; в Волгоградской области – А.В. Альбенского [1], Г.П. Озолина [33] и др.; в Воронежской области – Н.П. Кобранова [21], О.Г. Каппера [20], М.М. Вересина [8] и др. В Карелии есть исследования Н.О. Соколова [40] по селекции карельской березы.

В более позднее время появились обстоятельные работы сибирских исследователей В.Т. Бакулина [2], В.В. Тараканова [42–44], А.И. Земляного [16] и др.; в Воронежской области – Ю.П. Ефимова [15, 62], А.М. Шутяева [56, 57, 68], А.П. Царева [47–48, 54, 70, 71] и др.; в Поволжье – М.М. Котова [23], Н.В. Бессчетновой [4] и др.; в Кировской области – Л.И. Ворончихина [13], А.И. Видякина [10, 12] и др.; в Республике Коми – А.Л. Федоркова [46]; в Башкирии – В.П. Путьихина [39], В.Ф. Коновалова [22] и др.; в Карелии – В.И. Ермакова [14], А.А. Мордася [31], Н.В. Лаур [24, 25, 49] и др.

В этом направлении в России в разное время принимались также государственные программы, одна из которых получила наименование «Единый генетико-селекционный комплекс» (ЕГСК). Она предполагала учет количества отобранных плюсовых деревьев (ПД), плюсовых насаждений (ПН), созданных лесных семенных плантаций (ЛСП), архивов клонов плюсовых деревьев (АК), маточных плантаций (МП), постоянных лесосеменных участков (ПЛСУ), географических культур (ГК), популяционно-экологических культур (ПЭК), лесных генетических резерватов (ЛГР), испытательных культур (ИК).

Цель работы заключается в попытке проследить тенденции, возникшие в лесной селекции России за последние 25 лет, сравнить их с аналогичными достижениями в соседних странах с близкими климатическими условиями, и на основании полученных результатов оценить перспективы развития этого научно-производственного направления в нашей стране.

При анализе состояния и динамики развития ЕГСК использованы официальные данные государственных инвентаризаций за последние 25 лет. Среди них «Лесной фонд России», [28]; «Лесной реестр 2013» [27]; «Объекты лесного семеноводства», [32]; «Состояние лесных генетических ресурсов Российской Федерации», 2020 [41]. Проанализирован ряд научных отечественных публикаций. Для сравнительных исследований применялись также зарубежные источники, освещающие данные по развитию лесных генетических ресурсов в Финляндии [63], Швеции [60, 64, 65], Норвегии [69], Канаде [67].

Проанализированы количественные показатели отбора ПД (шт.); создания АК, ГК и ПЭК (га); выделения ЛГР (тыс. га) и ПН (тыс. га); организации временных лесосеменных участков (ВЛСУ) и ПЛСУ (га); закладки МП, ЛСП и ИК (га).

Материалы по развитию или деградации лесного ЕГСК в России проанализированы по годам. Для расчетов использованы указанные выше официальные отечественные данные и зарубежные публикации. При анализе тенденций развития отдельных направлений селекции применены средства Excel.

Динамика изменения основных объектов ЕГСК Российской Федерации в течение последних лет представлена в табл. 1. Анализ данных таблицы позволяет установить некоторые закономерности и тенденции развития отдельных объектов лесной селекции в стране.

Таблица 1

**Динамика объектов ЕГСК Российской Федерации**

| Объекты ЕГСК  | Год регистрации      |                      |                      | Примечание              |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
|               | 1996                 | 2013                 | 2019                 |                         |
| ПД, шт.       | 35 000 <sup>1</sup>  | 35 065 <sup>3</sup>  | 31 514 <sup>4</sup>  | –                       |
| АК, га        | 689 <sup>2</sup>     | 598,4 <sup>3</sup>   | 573,6 <sup>4</sup>   | –                       |
| ЛГР, тыс. га  | 18,0 <sup>2</sup>    | 215,3 <sup>3</sup>   | 149,5 <sup>4</sup>   | –                       |
| ПН, тыс. га   | 16,0 <sup>2</sup>    | 14,5 <sup>3</sup>    | 14,0 <sup>4</sup>    | –                       |
| ГК, га        | н. д.                | 872,1 <sup>2</sup>   | 812,0 <sup>4</sup>   | <sup>2</sup> На 2012 г. |
| ПЭК, га       | н. д.                | 31,3 <sup>2</sup>    | 35,1 <sup>4</sup>    | <sup>2</sup> На 2012 г. |
| ПЛСУ, тыс. га | 160,0 <sup>2</sup>   | 18,2 <sup>3</sup>    | 12,6 <sup>4</sup>    | <sup>2</sup> На 1983 г. |
| МП, га        | н. д.                | 208,0 <sup>3</sup>   | 186,0 <sup>4</sup>   | –                       |
| ЛСП, га       | 8 000,0 <sup>2</sup> | 6 039,8 <sup>3</sup> | 4 464,7 <sup>4</sup> | –                       |
| ИК, га        | 1 234,6 <sup>2</sup> | 725,2 <sup>3</sup>   | 785,1 <sup>4</sup>   | <sup>2</sup> На 2006 г. |

Примечание: <sup>1</sup> – [53]; <sup>2</sup> – [25]; <sup>3</sup> – [27]; <sup>4</sup> – [41]; н. д. – нет данных.

*Отбор плюсовых деревьев.* ПД рассматривают и как источник сохранения ценного генофонда, и как материал для научно обоснованного семеноводства. Их отбор важен, т. к. естественные леса, в первую очередь лучшие и наиболее доступные, вырубаются. ПД, погибшие из-за рубок или по другим причинам, восстановить будет невозможно. Количество ПД в России за период с 1996 по 2020 г. по разным данным [25, 27, 32, 41] представлено на рис. 1.

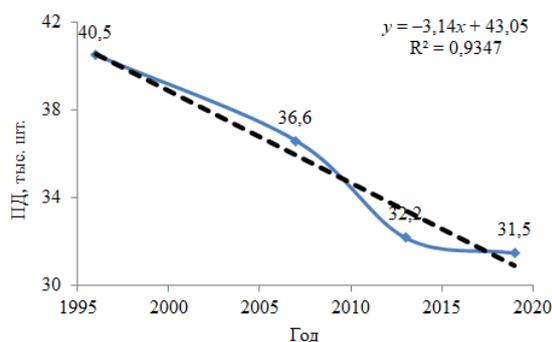


Рис. 1. Тренд отбора и сохранности ПД (по [25, 27, 32, 41])

Fig. 1. Trend of selection and survival of plus trees (according to [25, 27, 32, and 41])

Из данных рис. 1 видно, что число ПД в России за последние 25 лет значительно уменьшилось. Если учесть, что в 2018 г. площадь, занятая лесными насаждениями в нашей стране, составляла 769 531,7 тыс. га [41], то получается, что к 2020 г. на 24 419 га покрытой лесом территории было отобрано одно ПД. В середине 90-х гг. эта величина равнялась 18 714 га [53]. То есть интенсивность отбора ПД за 25 лет уменьшилась на 30 %. Рис. 2 иллюстрирует прямизну ПД Карелии.



Рис. 2. ПД Карелии: *а* – ель, Кривецкое лесничество; *б* – сосна обыкновенная, Петрозаводское лесничество. Фото Н.В. Лаур

Fig. 2. Plus trees of Karelia: *a* – Spruce plus tree, Krivetskoye forestry; *b* – Scots pine plus tree, Petrozavodsk forestry. Photos courtesy of N.V. Laur

*Архивы клонов плюсовых деревьев.* АК, создаваемые для сохранения ПД *ex situ*, в 1995 г. занимали 689 га. После инвентаризации 2007 г. – 569,9 га, на 1.01.2012 – 588,9 га [25], на 1.01.2014 – 598,4 га [27], на 1.01.2018 – 0,6 тыс. га [32], а на 1.01.2019 – 573,6 га [41]. То есть за 25 лет площадь архивов клонов в РФ уменьшилась на 20 %.

*Сохранение природного и ценного генофонда in situ.* Для сохранения природного генофонда лесных древесных пород используют ЛГР, а для сохранения фонда, практически ценного по каким-либо параметрам (рост, прямоствольность, устойчивость и др.), – ПН.

*Лесные генетические резерваты.* Выделение ЛГР к 1995 г. в России было осуществлено на незначительной площади (18 тыс. га). К 2003 г. их количество увеличилось в 13 раз – до 235 тыс. га, затем начало стабильно уменьшаться и к 2012 г. упало до 205 тыс. га [25]. К 2018 г. эта цифра составляла 197,7 тыс. га [32], в 2019 г. – 149 534,3 га [41]. То есть после максимального значения 2003 г. к 2019 г. площадь ЛГР сократилась на 57 %.

*Плюсовые насаждения.* В 1995 г. в России было отобрано 15 тыс. га ПН. Их максимальное количество было выделено к 2000 г. – 18 тыс. га [25]. После оно начало неуклонно снижаться и на 1.01.2018 г. сократилось до 14,1 тыс. га [32], а в 2019 г. – до 14 002,3 га [41]. Таким образом, после максимального значения в 2000 г. площадь сохранившихся ПН снизилась на 28,6 %.

*Лесное семеноводство.* Для успешного разведения многих хозяйственно ценных лесных древесных пород разработана целая система семеноводства, несколько отличающаяся (ввиду их более длительного онтогенеза) от семеноводства сельскохозяйственных культур. Здесь можно обозначить отдельные элементы лесосеменного дела: ГК и ПЭК, ВЛСУ и ПЛСУ, МП, ИК, ЛСП.

*Географические культуры.* Влияние географического происхождения семян на рост, устойчивость, качество древесины и другие признаки деревьев было отмечено еще в XIX в. и в дальнейшем изучалось в разных странах, в т. ч. и в России, на специально создаваемых ГК, в основном сосны и ели [8, 10, 18, 20, 29, 34, 52, 56, 68 и др.]. По данным филиала ФГУ «Рослесозащита», площадь ГК в России на 1.01.2012 г. составляла 872, 1 га [25], на 1.01.2019 г. – 812,0 га [41]. То есть за 7 лет численность ГК в России снизилась на 7,4 %.

*Популяционно-экологические культуры.* При исследовании ГК было обнаружено, что на качество древесных растений влияет не только географическое, но и экологическое происхождение семян [72]. В стране начали закладывать так называемые ПЭК некоторых древесных пород. При создании учитывались условия произрастания материнских особей. Примером таких культур могут служить ПЭК сосны обыкновенной в Кировской области [11]. В России на 1.01.2012 г. подобных культур числилось 31,3 га [25]. Через 7 лет, на 1.01.2019 г., их стало немного больше – 35,1 га [41], но для нашей страны эта площадь ничтожна, она не отражает огромного разнообразия условий местопроизрастаний.

*Временные лесосеменные участки.* ВЛСУ были рекомендованы в России в середине XX в. при проведении главных рубок на лесосеках особо крупных размеров, что должно было позволить собирать более ценные местные семена (рекомендовано до проведения сплошных рубок в лучших приспевающих насаждениях вырубать минусовые деревья) [26]. К сожалению, это предложение оказалось для лесозаготовительных фирм экономически невыгодным, и идею подготовки на площадях лесосек ВЛСУ так и не реализовали. В России при главных рубках из-за отсутствия более продвинутых методик семеноводства основная заготовка шишек хвойных пород проводится на лесосеках, причем со всех семяносящих деревьев, включая минусовые. Между тем, на ВЛСУ

целесообразно заготавливать семена местного происхождения и лучших для региона лесорастительных условий. Использование таких семян эффективнее по сравнению с использованием привозных семян неизвестных географического и экологического происхождений, создаваемые лесные культуры являются более устойчивыми. В официальных статистических документах по лесным генетическим ресурсам площади имеющихся в стране ВЛСУ не отражены.

*Постоянные лесосеменные участки.* ПЛСУ рекомендованы многими исследователями [3, 8, 9 и др.]. Положительные и отрицательные особенности ПЛСУ рассмотрены в работах [25, 50]. В одних регионах и условиях такие участки могут использоваться, в других это не всегда целесообразно. В частности, ПЛСУ показали неплохие результаты при сборе опадающих семян крупноплодных лиственных деревьев: дуба, бука, граба – в отличие от хвойных. В России максимальная величина площадей, отведенных под ПЛСУ, была отмечена в 1983 г. – 160 тыс. га [25]. С тех пор, вплоть до последнего времени, она неуклонно снижалась. Так, на 01.01.2019 г. их числилось 17 097,3 га, в том числе аттестованных – 12 596,6 га [41]. Таким образом, за последние 36 лет площадь ПЛСУ уменьшилась в 9,4 раза.

*Маточные плантации.* МП – это насаждения, создаваемые вегетативным потомством ПД в целях их массового размножения посредством заготовки черенков. В официальных сводках отражены в основном данные по хвойным породам. По состоянию на 1.01.2014 г. в России числилось 208,0 га МП [27]. Через 6 лет, на 1.01.2019 г., аттестованных МП было 186,0 га [41]. То есть количество МП каждый год становилось меньше на 3,7 га.

*Лесосеменные плантации.* ЛСП – это искусственно создаваемые на основе различных методов лесной селекции насаждения, предназначенные для получения семян с ценными наследственными свойствами. Выделяют следующие ЛСП: первого порядка; полуторного, или ЛСП повышенной генетической ценности (ПГЦ); второго и более высоких порядков. Большинство ЛСП России являются плантациями первого порядка (ЛСП-1). ЛСП-1,5 созданы в небольшом количестве, а ЛСП-2 почти отсутствуют, поскольку их закладка возможна только после испытания ПД в ИК, которых совершенно недостаточно. Примеры создания ЛСП в разных условиях приведены во 2-м томе сводки «Опытно-производственные селекционно-семеноводческие объекты Научно-исследовательского института лесной генетики и селекции» [35].

Наглядно тенденция создания ЛСП-1 в России за последние 25 лет представлена на рис. 3. Из них ПГЦ, или ЛСП-1,5, только 119,0 га, в т. ч. аттестованных – 72,2 га (1,6 %) [41]. В 1996 г. 1,0 га ЛСП был создан на 81 874 га лесной площади. К 2019 г. 1,0 га аттестованных ЛСП – на 172 359,1 га. То есть за 25 лет территория ЛСП в стране уменьшилась на 52 %. На рис. 4 представлено фото одной из ЛСП Карелии.

*Испытательные культуры.* ИК – один из важнейших этапов генетической оценки общей комбинационной способности отобранных материнских ПД. В случаях, когда известны опылители, в ИК возможна и оценка специфической комбинационной способности. Созданные в прошлом столетии ИК представляли собой только первые опытные работы. Известны труды Ф.А. Чепика [55] по созданию ИК в Петрозаводском лесхозе и на территории Карельской лесной опытной станции Ленинградского научно-исследовательского института лесного хозяйства [25, 38, 51, 55], исследователей Кировской области [12, 13], Новосибирской и других областей Сибири [42], Ленинградской области [6, 7].

Рис. 3. Тенденция уменьшения площадей ЛСП-1 в России (по [25, 27, 41])

Fig. 3. The area reducing trend of Forest Seed Orchards-1 in Russia (according to [25, 27, and 41])

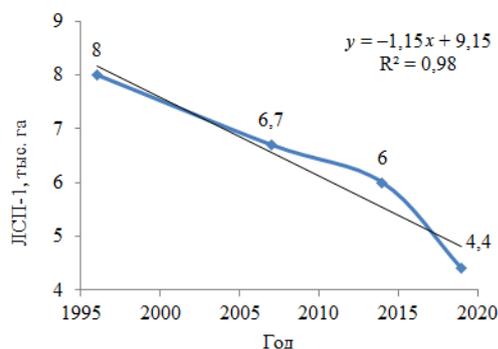


Рис. 4. Лесосеменная плантация Петрозаводского лесничества Карелии. Фото Н.В. Лаур

Fig. 4. Forest Seed Orchard of the Petrozavodsk forestry in Karelia. Photo courtesy of N.V. Laur

В Научно-исследовательском институте лесной генетики и селекции заложены ИК сосны обыкновенной, ели, лиственницы, дуба черешчатого, березы, ольхи черной, ореха грецкого [19].

Всего в России по данным ФБУ «Рослесозащита» к 2006 г. создано 1 234,6 га ИК [25]. На 1.01.2019 г. их осталось 785,1 га [41]. Следовательно, за 13 лет уменьшение площадей ИК составило 57 %, т. е. в среднем по 35 га в год.

Таким образом, в России за последние 10–25 лет произошло существенное сокращение ЕГСК (по всем показателям). В среднем списание объектов лесной селекции составило 50 % с колебаниями по отдельным показателям 7...940 %. Исключением было только создание ПЭК, размер которых увеличился и достиг 35,1 га [41]. Однако для страны в целом это количество представляет более чем незначительную величину, равную 0,000005 % от покрытой лесом площади.

Россия является самой многолесной в мире страной, расположенной в суровых условиях северного полушария земли. Близкими по климату являются такие государства, как Канада, Финляндия, Швеция, Норвегия и др. В связи с этим целесообразно проследить развитие лесных генетико-селекционных комплексов (ЛГСК) в них. Не все показатели ЛГСК можно найти в открытом доступе, хотя главные из них: количество отобранных ПД и созданных ЛСП – как правило, отражены различными информационными документами, которые мы попытались найти. В табл. 2 представлены некоторые доступные данные по ЛГСК указанных выше стран.

Таблица 2

## Некоторые показатели ЛГСК в зарубежных странах

| Число ПД, шт.               | АК, число клонов / площадь, га | ГК, число происхождений / га | ИК, число семей / га | ЛСП, га | Примечание  |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|---------|---|
| <i>Норвегия, 2012 [69]</i>  |                                |                              |                      |         |   |
| 22 584                      | 19 / н. д.                     | 113 / н. д.                  | 4 531 / н. д.        | 175,2   | –   |
| <i>Финляндия, 2012 [63]</i> |                                |                              |                      |         |   |
| 20 793                      | н. д.                          | н. д.                        | н. д.                | 2 147,4 | Планировалось в 2011–2025 гг. создать 240 га элитных ЛСП  |
| <i>Швеция, 2012 [60]</i>    |                                |                              |                      |         |   |
| 35 489                      | н. д.                          | н. д.                        | н. д.                | н. д.   | Обеспеченность в 2019 г. из ЛСП составила для ели 67 %, для сосны – 67 % [65]                     |
| <i>Канада, 2012 [67]</i>    |                                |                              |                      |         |   |
| 55 105                      | 26 608 / 120                   | 2 321 / н. д.                | 41 229 / н. д.       | 2 245,0 | Создано 4017 га ИК для испытания потомств 6601 семьи, полученных при контролируемом опылении [67] |

Сравнение данных табл. 2 для зарубежных стран и табл. 1 для России, а также других источников показало следующие различия. Одна из самых северных стран, Норвегия, в 2012 г. имела лесопокрытую площадь 8,3 млн га (ежегодный прирост древесины – более 1 м<sup>3</sup>/га). Как видно из данных табл. 2, здесь к 2012 г. было отобрано 22 584 ПД; создано 19 АК; заложено 15 опытных площадей ГК, на которых испытывали 113 провениенций, и 177 опытов по испытанию ПД для тестирования семенного потомства 4531 семьи. К этому времени было создано 29 ЛСП-1 на площади 175,2 га [69]. То есть в Норвегии в 2012 г. одно ПД отобрано в среднем на 367,5 га покрытой лесом площади, а 1 га ЛСП-1 приходился на 47 374,4 га.

Для сравнения, в России на 01.01.2012 г. аттестовано 35 065 ПД [25]. Покрытая лесной растительностью площадь в это время составляла 795 257,2 тыс. га. [27], т. е. одно ПД отобрано на 22 679,5 га. Таким образом, интенсивность отбора ПД у нас была в 61,7 раза ниже, чем в Норвегии. Что касается закладки ЛСП, то в этот год в России их числилось 6,2 тыс. га [25], или 1 га ЛСП-1 был заложен на 128 267,3 га покрытой лесом площади. То есть обеспеченность ЛСП-1 оказалась в 2,7 раза ниже по сравнению с Норвегией.

В Финляндии в 2011 г. числилось 20 793 ПД и 143 ЛСП на площади 2147,36 га [63]. Общая лесопокрытая площадь составляла на этот год 22,2 млн га, получается, что одно ПД отобрано на территории 1068 га, а 1 га ЛСП приходился на лесную площадь в 10 338 га. Интенсивность отбора ПД в нашей стране в 21 раз, а создания ЛСП в 12 раз ниже, чем в Финляндии.

Кроме того, в Финляндии запланировано в течение 15 лет (2011–2025 гг.) создание 240 га «элитных» (полуторного и второго порядков) ЛСП. Ряд финских клонов испытывают в ЛСП других стран [66]. Исследования А. Ahtikoski и Р. Pulkkinen [59] показали высокую экономическую эффективность ЛСП в Финляндии.

В Швеции в 2011 г. отобрано 35 489 ПД, в т. ч. главных лесных видов: *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *Pinus contorta* – 34 100 шт. Других видов (*Populus tremula* × *Populus tremuloides*, *Populus sp.*, *Quercus robur*, *Betula pubescence* и др.) – 1389 шт. [60]. «Продуктивная» лесная площадь страны составляет 22,5 млн га, т. е. интенсивность отбора ПД – 1 дер. на 634 га, что в 35 раз выше по сравнению с Россией.

Значительную часть семян ели, а также частично и сосны обыкновенной в Швецию в XX в. завозили из Белоруссии и Прибалтики. Для лесного хозяйства страны было важно перейти на самостоятельное обеспечение семенным материалом. В связи с чем отмечается: в 2019 г. 80 % использованных семян получены из семян шведских ЛСП, а семена сосны обыкновенной почти исключительно (99 %) выращены из семян местных ЛСП. Доля семян ели европейской из семян шведских ЛСП увеличилась до 67 % в 2019 г. [65]. В работе Н. Nayatgheibi [64] представлена положительная оценка эффективности ЛСП в Швеции.

Самой многолесной страной Северной Америки является Канада. Площадь ее лесов составляет 397 262 тыс. га [67], что на 93 млн га больше по сравнению с США [61]. В 2011 г. в естественных насаждениях Канады отобрано 55 105 ПД, 26 608 включены в АК (банки клонов), которые созданы на площади 120 га. После генетической проверки ПД в ИК и других опытах выделено 9456 селектантов. Всего было создано 775 ИК, в них изучали 41 229 семей 26 видов от ПД первичного отбора при свободном опылении. Кроме того, заложено 4017 га ИК для изучения потомств 6601 семьи 12 видов, полученных при контролируемом опылении.

ЛСП в Канаде созданы для 28 видов древесных растений. Первоначально 97 ЛСП на площади в 1138 га, включающие 12 016 семей, были заложены сеянцами от ПД. Многие из них были заменены сеянцами от лучших деревьев после их оценки в ИК. Затем посажено 110 ЛСП-1 из 8905 клонов на площади 412 га, после чего начали закладку ЛСП-2. К 2012 г. создано 695 ЛСП-2 из 8905 клонов, в которые включены и лучшие представители из ЛСП-1 [67]. То есть в стране было заложено 2245 га ЛСП разного селекционного уровня.

Таким образом, уже к 2012 г. в Канаде одно отобранное ПД приходилось на 7209 га лесопокрытой площади. То есть интенсивность отбора ПД в России была ниже в 3 раза, чем в Канаде. 1 га ЛСП в Канаде в 2012 г. был создан на 176 954 га лесопокрытой площади. В России только через 7 лет, в 2019 г., создано на 2,7 % ЛСП больше, чем в Канаде в 2012 г. По отчетной документации в нашей стране не числится ни 1 га ЛСП-2. По этому показателю наблюдалось и, к сожалению, наблюдается в настоящее время значительное отставание [41].

В целом если проанализировать один из важнейших показателей (отбор ПД), который нельзя упускать из-за угрозы невозвратной потери ценного природного генофонда, то можно получить результат, наглядно показанный на рис. 5.

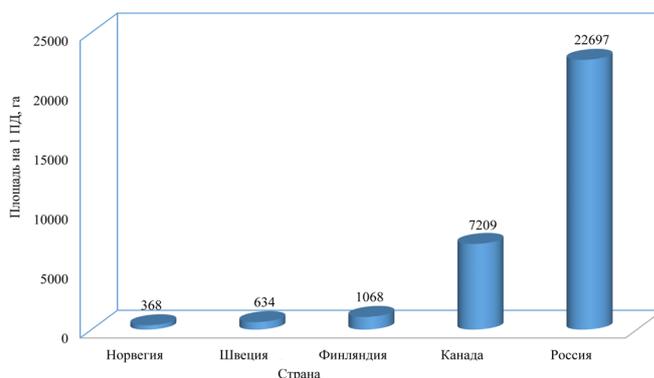


Рис. 5. Интенсивность отбора ПД в разных странах

Fig. 5. Selection intensity of plus trees in different countries

Из данных рис. 5 видно, что по отбору и сохранению ПД Россия в 2012 г. отставала от других стран в 3...61 раз (от Канады и Норвегии соответственно).

Второй важный показатель, который характеризует уровень заботы государства о создании новых лесов из селекционно-улучшенного и генетически ценного семенного материала, – это степень обеспеченности ЛСП (рис. 6).

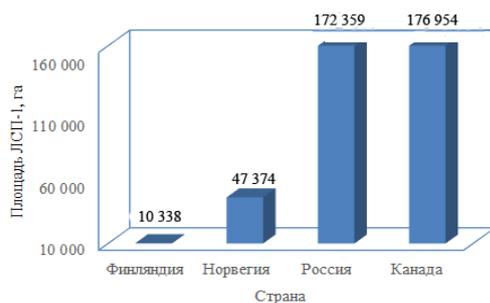


Рис. 6. Интенсивность создания ЛСП в России в 2019 г. и в других странах на 2012 г.

Fig. 6. Creation intensity of forest seed orchards in Russia in 2019 and in other countries as of 2012

Таким образом, сравнение развития лесной селекции в России с многолесными странами, расположенными в близких климатических условиях, показывает наше отставание как во временном, так и в географическом аспектах. Это отмечалось и в 1995, и в 2013 гг. [49, 53]. Но если в 2013 г. были определенные надежды на развитие лесной селекции России в прогрессивном направлении, то реалии настоящего времени продемонстрировали, что эти ожидания явно не оправдались.

Представленный в работе анализ показал, что существующая система управления лесами не нацелена на сохранение ценного генофонда лесных древесных пород и не может обеспечить устойчивого развития лесовосстановления. В России необходим поворот от направленности на истребление лесов к их восстановлению с учетом современных генетико-селекционных достижений, как отечественных, так и зарубежных.

#### Заключение

Проведенный анализ выявил, что фактически в России наблюдается регресс государственного лесного единого генетико-селекционного комплекса. За 25 лет списано в среднем 50 % с колебаниями по отдельным показателям 7...940 %. В то же время создание объектов лесного генетико-селекционного комплекса в арендованных лесах, которые в некоторых регионах занимают до 50 % и более площади лесов, в официальных сводках не отражено.

Наблюдаемый отрицательный результат обусловлен тем, что новые объекты не отбираются, не закладываются, а имеющиеся активно списываются из-за несвоевременности уходов, утраты документации, естественного старения, воздействия пожаров и отсутствия понимания важности проблемы со стороны управляющих органов.

Сравнение развития лесного генетико-селекционного комплекса в нашей стране и в других государствах с близкими климатическими условиями обрисовывает крайне неутешительную картину. Практически, мы отстаем от других северных стран по всем показателям в несколько раз.

Настало время разработать новую государственную долговременную программу генетико-селекционного улучшения лесных древесных пород, направленную на устойчивое развитие восстановления наших лесов и сохранение их ценного генофонда, определив ответственных за ее выполнение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Альбенский А.В. Селекция древесных пород и семеноводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1959. 306 с. Al'benskiy A.V. *Breeding of Woody Species and Seed Production*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1959. 306 p.
2. Бакулин В.Т. Триплоидный клон осины в лесах Новосибирской области // Генетика. 1966. № 11. С. 58–68. Bakulin V.T. Triploid Clone of Aspen in the Forests of the Novosibirsk Region. *Genetika* [Soviet Genetics], 1966, no. 11, pp. 58–68.
3. Беспаленко О.Н., Мамонов Д.Н. Опыт использования ПЛСУ сосны в Воронежской области // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений: материалы X Междунар. науч. конф. Красноярск: Сибир. гос. технол. ун-т, 2007. С. 3–5. Vespalenko O.N., Mamonov D.N. Experience of Using Pine Permanent Forest Seed Plots in the Voronezh Region. *Gardening, Seed Growing, Introduction of Woody Plants: Proceedings of the X International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2007, pp. 3–5.
4. Бессчетнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Эффективность отбора плюсовых деревьев: моногр. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2016. 464 с. Besschetnova N.N. *Scots Pine (Pinus sylvestris L.). Efficiency of Plus Tree Selection*: Monograph. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2016. 464 p.
5. Богданов П.Л. Тополя и их культура. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 104 с. Bogdanov P.L. *Poplars and Their Plantation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 104 p.
6. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Комплексная оценка генотипов ели европейской для создания лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 1(29). С. 20–29. Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Complex Genotype Estimation of Norway Spruce for Seed Plantations with Increased Genetic Value. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2016, no. 1(29), pp. 20–29.
7. Бондаренко А.С., Жигунов А.В., Левкоев Э.А. Влияние селекционных мероприятий на фенотипическое и генетическое разнообразие семенного потомства плюсовых деревьев ели европейской и сосны обыкновенной // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 216. С. 6–17. Bondarenko A.S., Zhigunov A.V., Levkoev E.A. Impacts of Selection Activities on Phenotypic and Genetic Diversity of Norway Spruce and Scotch Pine Plus Tree Seed Progenies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2016, iss. 216, pp. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.216.6-17>
8. Вересин М.М. Лесное семеноводство. М.: Гослесбумиздат, 1963. 158 с. Veresin M.M. *Forest Seed Production*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 158 p.

9. Вересин М.М., Ефимов Ю.П., Арефьев Ю.Ф. Справочник по лесному селекционному семеноводству. М.: Агропромиздат, 1985. 245 с. Veresin M.M., Efimov Yu.P., Aref'yev Yu.F. *Handbook of Forest Breeding Seed Production*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 245 p.

10. Видякин А.И. Влияние географического происхождения семян на рост сосны обыкновенной в таежной зоне Кировской области // Всесоюз. совещ. по лесной генетике, селекции и семеноводству. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1983. С. 118–119. Vidyakin A.I. Influence of Geographical Origin of Seeds on the Growth of Scots Pine in the Taiga Zone of the Kirov Region. *All-Union Meeting on Forest Genetics, Breeding and Seed Production*. Petrozavodsk, Kol'skiy filial AN SSSR Publ., 1983, pp. 118–119.

11. Видякин А.И. Географические и популяционно-экологические культуры сосны обыкновенной // Опытнo-производственные селекционно-семеноводческие объекты НИИЛГиС: сб. науч. тр. Т. 1 / отв. ред. Ю.П. Ефимов. Воронеж: НИИЛГиС, 2004. С. 31–36. Vidyakin A.I. Provenance Trial and Population-Ecological Plantations of Scots Pine. *Experimental and Production Breeding and Seed-Growing Facilities of the Research Institute of Forest Genetics and Breeding (NIILGiS): Collection of Academic Papers*. Vol. 1. Ed. by Yu.P. Efimov. Voronezh, NIILGiS Publ., 2004, pp. 31–36.

12. Видякин А.И. Эффективность плюсовой селекции древесных растений // Хвойные бореальной зоны. 2010. XXVII. № 1-2. С. 18–24. Vidyakin A.I. Efficiency of Plus Selection of Trees. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2010, vol. XXVII, no. 1-2, pp. 18–24.

13. Ворончихин Л.И., Видякин А.И., Овечкин С.М. Пути повышения эффективности работ по селекции сосны и ели в Кировской области // Селекция ценных форм древесных пород и их использование для создания целевых насаждений. Воронеж: Центр. науч.-исслед. ин-т лесной генетики и селекции, 1989. С. 79–83. Voronchikhin L.I., Vidyakin A.I., Ovechkin S.M. Methods to Improve the Efficiency of Pine and Spruce Breeding in the Kirov Region. *Breeding of Tree Species Valuable Forms and Their Use for the Creation of Target Plantations*. Voronezh, TsNIILGiS Publ., 1989, pp. 79–83.

14. Ермаков В.И. Посевные качества семян березы карельской от свободного и контролируемого опыления // Лесная генетика, селекция и семеноводство. Петрозаводск: Карелия, 1970. С. 503–512. Ermakov V.I. Sowing Qualities of Karelian Birch Seeds from Open and Controlled Pollination. *Proceedings of the Meeting "Forest Genetics, Breeding and Seed Production"*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 1970, pp. 503–512.

15. Ефимов Ю.П. Семенные плантации в селекции и семеноводстве сосны обыкновенной. Воронеж: Истоки, 2010. 253 с. Efimov Yu.P. *Seed Orchards in Breeding and Seed Production of Scots Pine*. Voronezh, Istoki Publ., 2010. 253 p.

16. Земляной А.И. О создании кедросадов на генетико-селекционной основе в агроландшафтах Западной Сибири // ГЕО-Сибирь. 2010. Т. 3, № 2. С. 210–214. Zemljanoj A.I. On Formation of Cedar Gardens in Agrolandscapes of West Siberia. *GEO-Sibir'* [GEO-Siberia], 2010, vol. 3, no. 2, pp. 210–214.

17. Иванников С.П. Селекция осины в условиях центральной лесостепи по быстрому росту и устойчивости против гнили // Быстрорастущие и хозяйственно-ценные древесные породы: (Разведение и их использование). М.: МСХ СССР, 1958. С. 94–99. Ivannikov S.P. Breeding of Aspen in the Central Forest-Steppe by Rapid Growth and Resistance to Rot. *Fast-Growing and Economically Valuable Tree Species: (Breeding and Their Use)*. Moscow, Ministerstvo sel'skogo khozyaystva SSSR Publ., 1958, pp. 94–99.

18. Ирошников А.И. Географические культуры хвойных в Южной Сибири // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. С. 4–110. Iroshnikov A.I. Provenance Trial Plantations of Conifers in Southern Siberia. *Provenance Trial Plantations and Plantations of Conifers in Southern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, pp. 4–110.

19. Испытательные культуры потомств плюсовых деревьев, отдельных биотипов, популяций, объектов ПЛСБ (объекты №№ 29-53) // Опытные-производственные селекционно-семеноводческие объекты НИИЛГиС: сб. науч. тр. Т. 2 / отв. ред. Ю.П. Ефимов. Воронеж: НИИЛГиС, 2004. С. 77–194. Progeny Test Plantations of Plus Trees, Individual Biotypes, Populations, and Objects of the Permanent Forest Seed Base (Objects No. 29–53). *Experimental and Production Breeding and Seed-Growing Facilities of the Research Institute of Forest Genetics and Breeding (NIILGiS): Collection of Academic Papers*. Vol. 2. Ed. by Yu.P. Efimov. Voronezh, NIILGiS Publ., 2004, pp. 77–194.

20. Каллер О.Г. Изучение экотипов древесных пород // Науч. зап. Воронеж. лесохоз. ин-та. Т. IX. Воронеж: Воронеж. обл. книгоизд-во, 1946. С. 56–64. Kapper O.G. Study of Tree Species Ecotypes. *Scientific Notes of the Voronezh Forestry Institute*. Vol. IX. Voronezh, Voronezhskoye oblastnoye knigoizdatel'stvo, 1946, pp. 56–64.

21. Кобранов Н.П. Селекция дуба. М.: Новая деревня, 1925. 37 с. Kobranov N.P. *Oak Breeding*. Moscow, Novaya derevnya Publ., 1925. 37 p.

22. Коновалов В.Ф., Насырова Э.Р. Состояние и закономерности роста сосны обыкновенной на лесосеменных объектах Республики Башкортостан // Вестник МГУЛ – Лесн. вестн. 2016. № 2. С. 60–65. Konovalov V.F., Nasyrova E.R. State and Growth Regularities of Scots Pine Forest Seed at the Objects of the Republic of Bashkortostan. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2016, no. 2, pp. 60–65.

23. Котов М.М. Генетика и селекция. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1997. Ч. 1. 284 с.; Ч. 2. 108 с. Kotov M.M. *Genetics and Breeding*. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 1997, part 1. 284 p.; part 2. 108 p.

24. Лаур Н.В. Отбор плюсовых деревьев и насаждений карельской березы в Карелии // Научные основы селекции древесных растений Севера. Петрозаводск: Ин-т леса Кар. ЦН РАН, 1998. С. 134–137. Laur N.V. Selection of Plus Trees and Plus Stands of Karelian Birch in Karelia. *Scientific Foundations for Breeding of Woody Plants of the North*. Petrozavodsk, Institut lesa KarNTs RAN Publ., 1998, pp. 134–137.

25. Лаур Н.В. Лесная селекция и семеноводство в Карелии: моногр. М.: МГУЛ, 2012. 160 с. Laur N.V. *Forest Breeding and Seed Production in Karelia: Monograph*. Moscow, MSFU Publ., 2012. 160 p.

26. Лаур Н.В., Царев А.П. Воспроизводство хвойных пород при использовании временных лесосеменных участков // Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование». СПб.: СПбГЛТУ, 2018. Т. 1. С. 171–173. Laur N.V., Tsarev A.P. Reproduction of Coniferous Species when Using Temporary Forest Seed Plots. *Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference "Forests of Russia: Politics, Industry, Science, and Education"*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2018, vol. 1, pp. 171–173.

27. Лесной реестр 2013: стат. сб. М.: Рослесинфорг, 2014. 690 с. *Forest Register 2013*. Statistical Collection. Moscow, Roslesinfor Publ., 2014. 690 p.

28. Лесной фонд России: справочник (по учету на 1 января 1993 г.). М.: ВНИИЦлесресурс, 1995. 280 с. *Forest Fund of Russia – a Reference Book (as of January 1, 1993)*. Moscow, VNIITslesresurs Publ., 1995. 280 p.

29. Лесосеменное районирование основных лесообразующих пород в СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 368 с. *Forest Seed Zoning of the Main Forest-Forming Species in the USSR*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 368 p.

30. Любавская А.Я. Лесная селекция и генетика. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 288 с. Lyubavskaya A.Ya. *Forest Breeding and Genetics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 288 p.

31. Мордась А.А. Научные основы и особенности создания лесосеменных плантаций хвойных в подзоне средней тайги // Селекция и лесное семеноводство в Карелии. Петрозаводск: Ин-т леса Кар. НЦ РАН, 1993. С. 176–193. Mordas' A.A. Scientific Basis and Features of Creation of Coniferous Forest Seed Orchards in the Middle Taiga Subzone. *Breeding and Forest Seed Production in Karelia*. Petrozavodsk, Institut lesa KarNTs RAN Publ., 1993, pp. 176–193.
32. Объекты лесного семеноводства. 03.05.2018. Режим доступа: <https://lesprominform.ru/news.html?id=9567> (дата обращения: 19.10.21). *Objects of Forest Seed Production*.
33. Озолин Г.П., Маттис Г.Я., Калинина И.В. Селекция древесных пород для защитного лесоразведения. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 153 с. Ozolin G.P., Mattis G.Ya., Kalinina I.V. *Breeding of Woody Species for Protective Afforestation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 153 p.
34. Опытнo-производственные селекционнo-семеноводческие объекты НИИЛГиС: сб. науч. тр. Т. 1 / отв. ред. Ю.П. Ефимов. Воронеж: НИИЛГиС, 2004. 196 с. *Experimental and Production Breeding and Seed-Growing Facilities of the Research Institute of Forest Genetics and Breeding (NIILGiS): Collection of Academic Papers*. Vol. 1. Ed. by Yu.P. Efimov. Voronezh, NIILGiS Publ., 2004. 196 p.
35. Опытнo-производственные селекционнo-семеноводческие объекты НИИЛГиС: сб. науч. тр. Т. 2 / отв. ред. Ю.П. Ефимов. Воронеж: НИИЛГиС, 2004. 213 с. *Experimental and Production Breeding and Seed-Growing Facilities of the Research Institute of Forest Genetics and Breeding (NIILGiS): Collection of Academic Papers*. Vol. 2. Ed. by Yu.P. Efimov. NIILGiS Publ., 2004. 213 p.
36. Правдин Л.Ф. Задачи и методы современного лесного семеноводства. М.: Гослесбумиздат, 1963. 48 с. Pravdin L.F. *Problems and Methods of Modern Forest Seed Production*. Moscow, Golebumizdat Publ., 1963. 48 p.
37. Проказин Е.П. Отбор плюсовых деревьев и создание семенных плантаций сосны. Пушкино: ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, 1961. 15 с. Prokazin E.P. *Selection of Plus Trees and Creation of Pine Seed Orchards*. Pushkino, VNIILM Publ., 1961. 15 p.
38. Прокопюк В.М., Раевский Б.В. Современное состояние и основные характеристики постоянной лесосеменной базы хвойных видов Республики Карелия // Современное лесное хозяйство – проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию «ВНИИЛГИСбиотех». Воронеж: Истоки, 2020. С. 79–82. Prokopyuk V.M., Raevskiy B.V. Current State and Main Characteristics of the Permanent Forest Seed Base of Coniferous Species of the Republic of Karelia. *Modern Forestry: Problems and Prospects. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology*. Voronezh, Istoki Publ., 2020, pp. 79–82.
39. Путенихин В.П. Популяционная структура и сохранение генофонда хвойных видов на Урале: автореф. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 2000. 48 с. Putenikhin V.P. *Population Structure and Gene Pool Conservation of Coniferous Species in the Urals*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 2000. 48 p.
40. Соколов Н.О. Карельская береза. Л.: ЛТА, 1959. 34 с. Sokolov N.O. *Karelian Birch*. Leningrad, LTA Publ., 1959. 34 p.
41. Состояние лесных генетических ресурсов Российской Федерации. 2-й Национальный доклад Российской Федерации, представленный ФАО для подготовки доклада «Лесные генетические ресурсы мира». М.: ВНИИЛМ, 2020. 225 с. *State of Forest Genetic Resources of the Russian Federation*. 2nd National Report of the Russian Federation, Submitted to FAO for the Preparation of the Report “Forest Genetic Resources of the World”. Moscow, VNIILM Publ., 2020. 225 p.

42. Тараканов В.В., Кальченко Л.И. Фенетический анализ клоновых и естественных популяций сосны в Алтайском крае. Новосибирск: Гео, 2015. 108 с. Tarakanov V.V., Kal'chenko L.I. *Phenetic Analysis of Clonal and Natural Pine Populations in Altai Krai*. Novosibirsk, Geo Publ., 2015. 108 p.

43. Тараканов В.В., Демиденко В.П., Ишутин Я.Н., Бушков Н.Т. Селекционное семеноводство сосны обыкновенной в Сибири. Новосибирск: Наука, 2001. 230 с. Tarakanov V.V., Demidenko V.P., Ishutin Ya.N., Bushkov N.T. *Breeding Seed Production of Scots Pine in Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001. 230 p.

44. Тараканов В.В., Дубовик Д.С., Роговцев Р.В., Зацепина К.Г., Бугаков А.В., Гончарова Т.В. Состояние и перспективы развития генетико-селекционного комплекса хвойных пород в Сибири (на примере Новосибирской области) // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 3(43). С. 5–24. Tarakanov V.V., Dubovik D.S., Rogovtsev R.V., Zatssepina K.G., Bugakov A.V., Goncharova T.V. State and Perspectives for Development of the Genetic-Breeding Pool of Conifers in Siberia (Based on the Example of the Novosibirsk Region). *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2019, no. 3(43), pp. 5–24. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2019.3.5>

45. Тольский А.П. Лесное семеноводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. 160 с. To'lsky A.P. *Forest Seed Production*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1950. 160 p.

46. Федорков А.Л. Объем и качество ствола гибридной и обычной осины в клоновом архиве // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 92–98. Fedorkov A.L. Stem Volume and Quality of Hybrid and Common Aspen in the Clonal Archive. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forest Journal], 2021, no. 1, pp. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-92-98>

47. Царев А.П. Сортоведение тополя. Воронеж: ВГУ, 1985. 152 с. Tsarev A.P. *Theory and Practice of Breeding New Poplar Varieties*. Voronezh, VGU Publ., 1985. 152 p.

48. Царев А.П. Программы лесной селекции в России и за рубежом: моногр. М.: МГУЛ, 2013. 164 с. Tsarev A.P. *Programs of Forest Breeding in Russia and Abroad: Monograph*. Moscow, MSFU Publ., 2013. 164 p.

49. Царев А.П., Лаур Н.В. Перспективные направления селекции и репродукции лесных древесных растений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 36–44. Tsarev A.P., Laur N.V. Promising Trends of Breeding and Reproduction of Woody Plants. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 2, pp. 36–44. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/11f/lh3.pdf>

50. Царев А.П., Лаур Н.В. Создание постоянных лесосеменных участков // Тр. Кубан. гос. аграр. ун-та. 2018. № 73. С. 240–244. Tsarev A.P., Laur N.V. Making Permanent Forest Seed Stands. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Kuban State Agrarian University], 2018, no. 73, pp. 240–244. DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-73-240-244>

51. Царев А.П., Лаур Н.В. Испытательные культуры *Pinus sylvestris* в Республике Карелия // Тр. Кубан. гос. аграр. ун-та. 2020. № 85. С. 266–272. Tsarev A.P., Laur N.V. Test Plantations of *Pinus sylvestris* in Karelia Republic. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Kuban State Agrarian University], 2020, no. 85, pp. 266–272. DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-85-266-272>

52. Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Селекция лесных и декоративных древесных растений / под общ. ред. А.П. Царева. М.: МГУЛ, 2014. 552 с. Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Breeding of Forest and Decorative Woody Plants*. Ed. by A.P. Tsarev. Moscow, MSFU Publ., 2014. 552 p.

53. Царев А.П., Лаур Н.В., Щурова М.Л. Состояние и проблемы развития постоянной лесосеменной базы в Республике Карелия // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 1996. Вып. 1. С. 100–103. Tsarev A.P., Laur N.V., Schurova M.L. State and Problems of Devel-

opment of the Permanent Forest Seed Base in the Republic of Karelia. *Trudy lesoinzhenerernogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 1996, iss. 1, pp. 100–103. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.1996.2377>

54. Царев А.П., Плугатарь Ю.В., Царева Р.П. Селекция и сортоиспытание тополей: моногр. / под общ. ред. А.П. Царева. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. 252 с. Tsarev A.P., Plugatar' Yu.V., Tsareva R.P. *Breeding and Variety Testing of Poplars*: Monograph. Ed. by A.P. Tsarev. Simferopol, ARIAL Publ., 2019. 252 p.

55. Ченик Ф.А. Проблемы сохранения генофонда древесных растений // Лесное хозяйство и многообразие природы: Финляндия, Республика Карелия и Карельский перешеек. Йоэнсуу: Европ. ин-т леса, 1995. С. 449–452. Chepik F.A. Problems of Preserving the Gene Pool of Woody Plants. *Forestry and Nature Diversity: Finland, the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus*. Joensuu, EFI Publ., 1995, pp. 449–452.

56. Шутяев А.М. Биоразнообразие дуба черешчатого и его использование в селекции и лесоразведении. Воронеж: НИИ лесной генетики и селекции, 2000. 336 с. Shutyaev A.M. *Biodiversity of English Oak and Its Use in Breeding and Afforestation*. Voronezh, NIILGiS Publ., 2000. 336 p.

57. Шутяев А.М. Изменчивость хвойных видов в испытательных культурах Центрального Черноземья. М.; Воронеж: НИИ лесной генетики и селекции, 2007. 296 с. Shutyaev A.M. *Variability of Coniferous Species in Progeny Field Tests of the Central Chernozem Region*. Moscow, NIILGiS Publ., 2007. 296 p.

58. Яблоков А.С. Селекция древесных пород. М.: Сельхозиздат, 1962. 487 с. Yablokov A.S. *Breeding of Woody Species*. Moscow, Sel'khozizdat Publ., 1962. 487 p.

59. Ahtikoski A., Pulkkinen P. Cost-Benefit Analysis of Using Orchard or Stand Seed in Scots Pine Sowing, the Case of Northern Finland. *New Forests*, 2003, vol. 26, iss. 3, pp. 247–262. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024423719864>

60. Black-Samuelsson S. *The 1st Report on the State of the World's Forest Genetic Resources. Country Report: Sweden*. Sweden, Skogsstyrelsen, 2012. 52 p. Available at: <https://www.fao.org/3/i3825e/i3825e66.pdf> (accessed 07.04.20).

61. *Country Report on the State of Forest Genetic Resources United States of America*. USA, 2012. 56 p. Available at: <https://www.fao.org/3/i3825e/i3825e74.pdf> (accessed 07.04.20).

62. Efimov J.P. Some Results on the Regularities of Seed Crops in Scots Pine Seed Orchards. *Silva Fennica*, 1980, vol. 14, no. 1, pp. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.a15007>

63. *FAO State of the Forest Genetic Resources in Finland 2011*. Finland, Finish Forest Research Institute, 2012. 32 p. Available at: <https://www.fao.org/3/i3825e/i3825e25.pdf> (accessed 07.04.20).

64. Hayatgheibi H., Berlin M., Haapanen M., Kärkkäinen K., Persson T. Application of Transfer Effect Models for Predicting Growth and Survival of Genetically Selected Scots Pine Seed Sources in Sweden. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 12, art. 1337. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11121337>

65. Levererade skogsplantor 2019. *Sveriges officiella Statistik Statistiska meddelanden JO 0313 SM 2001*. Statistiska meddelanden från Skogsstyrelsen, 2019. 29 p. Available at: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/statistik/statistiska-meddelanden/sm-levererade-skogsplantor-2019-rattad-ny.pdf> (accessed 07.04.20).

66. Neyko I., Kolchanova O., Monarkh V., Poznyako S. Seed Productivity and Variability of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Clones of Finnish Origin in Seed Orchard in the Central Part of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2020, vol. 62(1), pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.2478/ffp-2020-0001>

67. *Report on The State of Canada's Forest Genetic Resources*. Canada, 2012. 151 p. Available at: <https://www.fao.org/3/i3825e/i3825e11.pdf> (accessed 07.04.20).

68. Shutyaev A.M., Giertych M. *Scots Pine (Pinus sylvestris L.) in Eurasia – a Map Album of Provenance Site Interactions*. Kornik, Poland, Institute of Dendrology, 2003. 266 p.

69. Skrøppa T. *State of Forest Genetic Resources in Norway*. Norwegian Country Report to the Preparation of the FAO Report on The State of the World's Forest Genetic Resources. Norwegian Genetic Resource Centre, 2012. 47 p.

70. Tsarev A. The Influence of Sexual Dimorphism on the Phenotypical Properties of Poplar. *Silvae Genetica*, 2020, vol. 69, pp. 73–77. DOI: <https://doi.org/10.2478/sg-2020-0010>

71. Tsarev A.P. Growth and Breeding of Aspen in Russia. *Silvae Genetica*, 2013, vol. 62, iss. 4-5, pp. 153–160. DOI: <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0020>

72. Veresin M.M. The Influence of Seeds of *Pinus sylvestris* L. on the Growth of Cultures. *Reports Submitted by Scientists-Participants of the International Symposium of Forest Tree Breeding, Genetics and Seed Production of Coniferous Tree Species, Novosibirsk, June 19–25, 1972, Part I*. Pushkino, 1972, pp. 45–61.

УДК 630\*232:582.475.4(470.51/.54)  
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-56-68

## ОЦЕНКА КУЛЬТУР КЕДРА СИБИРСКОГО В КОНЦЕ ПЕРВОГО КЛАССА ВОЗРАСТА

*Г.Г. Терехов, д-р с.-х. наук; ResearcherID: AAC-8684-2020,*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>*

*Е.М. Андреева, канд. биол. наук; ResearcherID: AAD-3340-2020,*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>*

*С.К. Стеценко, канд. биол. наук; ResearcherID: AAD-2834-2020,*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-3817>*

Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144;  
e-mail: terekhov\_g\_g@mail.ru, e\_m\_andreeva@mail.ru, stets\_s@mail.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 19.03.20 / Принята к печати 18.06.20

---

**Аннотация.** Изучены 40-летние культуры кедр сибирского, заложенные площадками как постоянный семенной участок. Цель – оценить сохранность, состояние и основные таксационные показатели культур кедр сибирского на южной границе его ареала в конце первого класса возраста; определить роль естественного возобновления деревьев и кустарников в развитии культур кедр сибирского; совершенствовать технологические подходы для эффективного восстановления высокоценных биологических ресурсов. Использованы общепринятые в лесоводстве, лесоведении и лесной таксации методики. Установлено, что сохранность кедр сибирского на участке составляет примерно 31 % (678 шт./га), из них без повреждения ствола – 406 шт./га. Лишь около четверти кедров произрастают при слабом затенении, остальные постоянно затенены естественным возобновлением и имеют разную степень угнетения. Генеративные органы у 44-летних деревьев кедр не обнаружены. На начальном этапе роста культур основным фактором, негативно влияющим на их сохранность и состояние, является повреждение кедр лосями. Рубка ухода традиционным способом с оставлением пней, от которых образуется много поросли лиственных видов, привлекает данных животных на участок в зимнее время, где в качестве корма они используют поросль, а также охвоенную часть кедр сибирского. На последующих этапах развития при отсутствии ухода на деревья отрицательно воздействует естественное возобновление, сдерживая их рост и развитие. Для предотвращения дальнейшего ухудшения состояния кедр сибирского необходимо снятие напряженности в смешанном биоценозе. Здесь требуются отличающиеся от существующих способы и методы проведения лесоводственных мероприятий: кольцевание или инъекция препаратов в стволы деревьев естественного возобновления, вызывающие усыхание на корню, что значительно уменьшает либо исключает появление поросли лиственных пород. Это позволит снизить посещаемость участка лосями и минимизирует их воздействие на кедр сибирский. Сплошное усыхание сопутствующих деревьев увеличит освещенность крон кедр и улучшит его почвенное питание, что обеспечит хороший рост корней, ствола и кроны, ускорит начало образования генеративных органов. Данные технические решения могут быть использованы во всей лесной зоне при искусственном выращивании высокоценной породы – кедр сибирского.

**Для цитирования:** Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К. Оценка культур кедр сибирского в конце первого класса возраста // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 56–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-56-68

---

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

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН».

**Ключевые слова:** кедр сибирский, сосна кедровая сибирская, повреждаемость, угнетение, показатели роста, многоствольность кедра сибирского.

## EVALUATION OF SIBERIAN STONE PINE PLANTATIONS AT THE END OF THE FIRST AGE CLASS

**Gennadiy G. Terekhov**, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAC-8684-2020](https://orcid.org/0000-0002-2312-9224),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

**Elena M. Andreeva**, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAD-3340-2020](https://orcid.org/0000-0003-2651-2541),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

**Svetlana K. Stetsenko**, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAD-2834-2020](https://orcid.org/0000-0002-4885-3817),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-3817>

Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; e-mail: [terekhov\\_g\\_g@mail.ru](mailto:terekhov_g_g@mail.ru), [e\\_m\\_andreeva@mail.ru](mailto:e_m_andreeva@mail.ru), [stets\\_s@mail.ru](mailto:stets_s@mail.ru)

---

Original article / Received on March 19, 2020 / Accepted on June 18, 2020

---

**Abstract.** The 40-year-old plantations of Siberian stone pine laid out as a permanent seed plot have been studied. The research purpose is to study the integrity, state and main forest inventory parameters of the Siberian stone pine plantations on the southern line of the species range at the end of first age class; to determine the role of natural renewal of trees and shrubs on the development of the Siberian stone pine plantations; to improve process solutions for efficient renewal of high-value biological resources. The research uses the methods generally accepted in forestry, forest science and forest inventory. It is found that the integrity of Siberian stone pine on the site is about 31 % (678 pcs/ha), wherein 406 pcs/ha are without damage to the trunk. Only about 25 % of Siberian stone pine trees grow under low shade, the rest of them are constantly shaded by natural renewal and have varying degrees of suppression. No generative organs were found in 44-year-old Siberian stone pine trees. At the initial stage of plantations growth, the main factor negatively affecting the integrity and state of trees is the damaging of Siberian stone pine by moose. Traditional improvement thinning with leaving stumps that produce many shoots of deciduous species attracts moose to the site in winter, where they use young growth of deciduous species and the covered with needles part of Siberian stone pine as forage. Subsequently, in the absence of tending, natural renewal negatively affects the Siberian stone pine trees, inhibiting growth and formation. It is necessary to remove the negative influence in the mixed biocenosis in order to prevent further deterioration of the Siberian stone pine state. This requires completely different technological solutions for forestry activities such as ringing or injection of trees of natural renewal, causing drying at the root, which significantly reduces or eliminates the emergence of deciduous young growth. This will decrease the attractiveness of the site for moose and minimize their impact on Siberian stone pine. The clear drying of surrounding trees will enhance the illumination of Siberian stone pine crowns and improve their soil nutrition, ensuring good root, trunk, and crown growth and accelerating the beginning of the formation of generative organs. These technical solutions can be used throughout the forest zone for the artificial cultivation of the high-value species – Siberian stone pine.

**For citation:** Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K. Evaluation of Siberian Stone Pine Plantations at the End of the First Age Class. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 56–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-56-68

---

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

**Funding:** The work is carried out within the framework of the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Keywords:** Siberian stone pine, Siberian cedar, damage rate, suppression, growth indices, Siberian stone pine multi-stemming.

### Введение

Благодаря своей долговечности, многосторонней полезности и большой экономической значимости леса с участием сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.) занимают особое место в числе природных лесных ресурсов Урала, Сибири и Дальнего Востока [2]. Данный вид распространен не только в России, но также в северной части Монголии и Китая [12, 14, 26, 28, 33]. Территория, занимаемая сосной кедровой сибирской (далее по тексту – кедром, кедром сибирским), значительно больше, чем занятая кедром корейским (*Pinus koraiensis* Siebold et Zuss.) и кедром европейским (*Pinus cembra* L. Endl.), взятыми вместе [27, 29]. Деревья этих хвойных пород являются основной кормовой базой для широкого круга лесных животных и птиц, а также многие столетия обеспечивают продовольственный ресурс людям.

Кедр сибирский – редкий пример соединения в одном дереве долговечности и зимостойкости, декоративности, а также оздоровительных, питательных, целебных и кормовых свойств [25, 31, 32]. Вид теневынослив в молодости и требователен к свету в зрелом возрасте [12, 20, 21, 27]. Распространение этой ценной породы происходит за счет диких животных и птиц либо искусственным путем. Благодаря высокой интродукционной адаптивности он способен произрастать в местностях с разными экологическими условиями [4, 6, 7, 14, 16, 20, 21, 25, 27, 30, 35].

Общая площадь кедровых лесов на территории Свердловской области составляет 716,9 тыс. га. Наибольшее количество таких лесов сосредоточено в северной части региона, наименьшее – на юге. Несмотря на то, что вырубка кедра сибирского запрещена, количество естественных насаждений с его участием постоянно сокращается. В южной части ареала возобновление этой породы крайне слабое, прежде всего из-за частых пожаров, истребления урожая шишек населением, птицами, дикой зоофауной, а появившегося подростка – домашними и дикими животными. Восстановление кедра в подобных условиях происходит преимущественно искусственным путем.

Посадка кедра сибирского в Свердловской области за последние 60 лет проведена на площади около 7 тыс. га. На преобладающей части лесокультурных участков он смешан с сосной обыкновенной или елью сибирской. Лесоводственная эффективность кедра в составе таких пород оказывается невысокой [1, 24]. Чистые культуры создают редко, площадь их невелика. Посадка семян биогруппами применяется только при закладке насаждений специального назначения (орехоносных насаждений) [13], поэтому изучение состояния, роста кедра сибирского в подобных посадках, наличия у него генеративных органов на разных стадиях развития является актуальной задачей.

Цель работы – изучить сохранность, состояние и таксационные показатели кедра сибирского, созданного биогруппами, на южной границе его ареала; выявить влияние естественного возобновления других древесных видов на развитие культур кедра сибирского; совершенствовать технологические подходы для эффективного выращивания ценного биологического ресурса.

*Объекты и методы исследования*

Объектом исследований являлся участок 40-летних культур кедр сибирского площадью 6,8 га, заложенный в 1979 г. по проекту Союзгипролесхоза как постоянный лесосеменной участок (орехоносное насаждение) для получения товарного ореха. Участок расположен на свежей вырубке в ельнике-сосняке травяном Починковского участкового лесничества (кв. 109) Невьянского лесничества (ранее Билимбаевский лесхоз) в подзоне южнотаежных лесов среднеуральской низкогорной провинции уральской горной лесной области [11]. Почва дерново-подзолистая суглинистая горнолесная; режим увлажнения – устойчиво свежий. По полосам, предварительно расчищенным передним отвалом трактора ТДТ-55, нарезали площадки размером 2×2,5 м (400–430 шт./га), размещение – 4,8×5,0 м. На каждой площадке высаживали по 5 отсортированных 4-летних сеянцев (2150–2250 шт./га) с высотой стволика не менее 12 см. Через год, после отпадения некоторых растений, культуры дополняли до первоначальной густоты сеянцами 5 лет. Агротехнические уходы проводили до 6 лет, а лесоводственные – в 9-летнем (осветление) и в 19-летнем (прочистка) возрасте. При этом вырубали в основном деревья лиственных видов. Прореживание культур кедр сибирского отсутствовало.

Изучение всех деревьев и кустарников проводили на пробных площадях [18], которые закладывали после обследования всего участка. По состоянию ствола и условиям произрастания все живые деревья кедр разделены на 4 варианта: 1 – деревья без повреждения ствола, растущие в окнах и со слабым затенением верхушки; 2 – в окнах, с поврежденным стволиком и постоянным боковым затенением всей кроны; 3 – без повреждения стволика, под пологом с постоянным затенением всей кроны; 4 – с поврежденным стволиком, находящиеся под пологом. Распределение кедр по категориям роста (максимальный, средний и минимальный) выполнено как при отборе модельных деревьев [10]. Санитарная оценка культур – по [3].

*Результаты исследования и их обсуждение*

Обследование всего участка позволило установить, что из-за отсутствия рубок ухода в последние 20 лет образовалось смешанное насаждение с преобладанием естественного возобновления деревьев и кустарников: березы, ели, сосны, пихты, лиственницы, ивы козьей, рябины, черемухи. Их развитие по территории участка было неравномерным. Состав древостоя – 1К8Б1Е едСПхЛцОс, сомкнутость древесного полога – 0,7–1,0. Почти все стволики осины, ивы козьей и рябины обыкновенной (общей численностью 7–10 тыс. шт./га) сломаны лосями, у многих деревьев кедр стволы также повреждены.

Первоначального количества растений кедр сибирского, посаженных в одну площадку, не обнаружено. Преобладали площадки с одним живым деревом – 66,7 % от общего количества, площадок с 3 и 2 экземплярами было немного – 14,3 и 15,9 % соответственно, с 4 – единичные случаи, 3,2 %. Всего на территории сохранилось в среднем 678 шт./га (30,8 % от исходной густоты) деревьев разного состояния. В сформировавшемся насаждении кедр произрастают в разных условиях: небольшая часть деревьев (около трети) – в окнах, с открытой верхушкой, либо с ее слабым периодическим затенением с солнечной стороны;

другая часть, преобладающая, – в окнах при постоянном боковом затенении всей кроны и под пологом естественного возобновления при постоянном затенении кроны.

Таксационные показатели деревьев в смешанном насаждении приведены на рис. 1. Средние высота и диаметр кедр сибирского в культурах были значительно меньше, чем эти показатели у деревьев естественного возобновления, которые появились на участке позже кедр. Лидирующее положение занимали хвойные породы, оставленные в процессе двух приемов рубок ухода, в то время как лиственные вырубались полностью. На лесокультурном участке почти все они оказались в первом ярусе древостоя, а преобладающая часть кедров – во втором. Полной сомкнутости крон деревьев естественного возобновления пока не произошло, но в дальнейшем кедр сибирский всюду окажется под пологом.

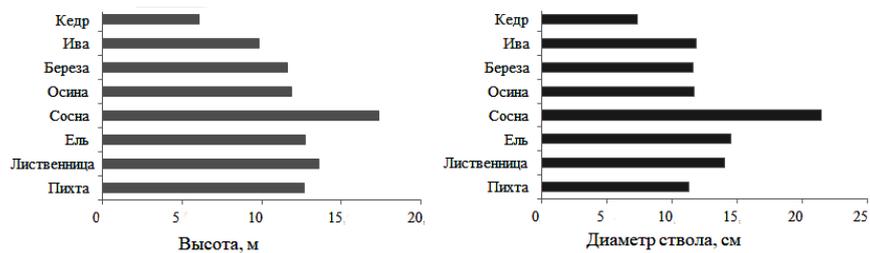


Рис. 1. Таксационные показатели кедр сибирского и деревьев естественного возобновления на участке

Fig. 1. Forest inventory parameters of Siberian stone pine and trees of natural renewal on the site

Деревьев кедр сибирского без повреждения ствола в окнах и со слабым затенением верхушки было 26 % (от всех живых деревьев), с поврежденным стволиком в окнах при постоянном боковом затенении всей кроны – 25 %, без повреждения стволика под пологом – 34 % и с поврежденным стволиком под пологом – 15 %.

Основным фактором неблагоприятного воздействия на стволик кедр сибирского на начальном этапе роста культур является повреждение кедр лосями. Целостность стволика нарушена этими животными у 40 % сохранившихся деревьев. Первичный слом отмечен на высоте 0,7 м при достижении культурами 9–12-летнего возраста. В это время стволик кедр сибирского превышает уровень снегового покрова, а после осветления культур на участке появляется молодая поросль. Рубка ухода, проведенная с помощью ручных инструментов традиционным способом, «на пень», вызывает образование огромного количества поросли лиственных видов, которая привлекает лосей и в течение нескольких лет служит для них кормовой базой. Вместе с порослью лоси поедают хвою и ветви кедр сибирского.

Повреждение лосями верхушечной части стволика кедр сибирского приводит к усыханию главного побега, а от нижележащей мутовки центрального стволика образуется одна или несколько вершин. Через 5–6 лет из них формируется соответствующее число стволиков, имеющих разную высоту и разный диаметр, т. е. от одного ствола на высоте 1,0–1,6 м появляется несколько стволиков (многоствольность). Среди живых деревьев кедр сибирского двуствольных отмечено 16,1 %, а с большим количеством стволов – 2,2 %.

Нарушение целостности ствола сдерживает прирост кедров сибирского в высоту. Несмотря на увеличение возраста культур, кратность повреждений лосями уже новых стволиков у одних и тех же кедровых деревьев, особенно у отстающих в росте (под пологом естественного возобновления или с поврежденным стволиком в окнах), возрастает до 3 раз. Образование нескольких тонких вершин увеличивает риск слома снегом какой-либо из них. Заметно сокращается повреждаемость лосями верхней части ствола кедров, когда он достигает высоты 3 м и более. Ветви повреждены до высоты 2,5 м. Кроме того, лоси объедают кору деревьев кедров сибирского с диаметром ствола выше 6 см (на высоте 1–2,5 м). Встречаются экземпляры, имеющие многократные повреждения коры (11,8 %).

Предшествующие исследования в рядовых культурах кедров сибирского 10–30-летнего возраста [1, 24] свидетельствуют о том, что лоси могут наносить значительный вред деревьям, становиться причиной отпада большого количества деревьев, сводить на нет усилия лесоводов. Реконструкцию на таких участках не проводят, и они развиваются естественным путем: хозяйственно ценная порода сменяется другими видами. Надежные меры защиты кедров от лосей пока отсутствуют, поэтому, чтобы снизить посещаемость лосями участков культур кедров сибирского, следует проводить мероприятия по удалению молодой поросли лиственных пород – привлекающего лосей корма.

На следующем этапе развития культур фактором, негативно воздействующим на их рост и состояние, является естественное возобновление древесных видов, которые на большей части участка занимают верхний ярус. Постоянное боковое затенение апикальной точки кедров, произрастающих в окнах, замедляет рост ствола в высоту и по диаметру. Но наиболее выражено это под кроной либо в самой кроне деревьев естественного возобновления, где кедр подвержен значительному угнетению: охвоение ветвей слабое, прирост центральных побегов и стволика минимальный (3 и 7 см). Из-за медленного увеличения высоты деревьев кедров охвоенная верхняя часть ствола и кроны становятся доступными для лосей на более продолжительный срок.

Апикальная часть ствола кедров, расположенных в периферийной части кроны деревьев лиственных пород (ивы козьей, березы, осины), подвергается постоянному механическому воздействию, «охлестыванию», со стороны тонких ветвей лиственных пород. На ранней стадии развития молодых побегов кедров происходит их слом. В следующем году на вершине ствола образуется несколько новых побегов (2...5), а в дальнейшем – многоствольность. В зимний период на ветвях деревьев естественного возобновления, чаще сосны, ели, пихты, скапливаются большие снежные комья, которые при падении на кедр ломают вершины экземпляров 2–5 лет.

Деревья кедров сибирского одного возраста (44 года) в культурах имеют разную форму кроны. Причиной становятся условия местопрорастания и биотические факторы. У деревьев в варианте 1 форма кроны овальная (эллипсоидная). В местах прикрепления к стволу ветви имеют диаметр 3...5 см. Охвоение густое, преобладает зеленая окраска. Протяженность кроны – 88 % от высоты ствола (см. таблицу). Ее максимальный диаметр (более 3 м) отмечен в средней части, величина просветов – около 50 %. Горизонтальная проекция крон всех деревьев в этом варианте – почти 15 % от площади в 1 га. Нижние мутовочные ветви повреждены лосями, хвоя на концах отсутствует.

### Характеристика кроны кедр сибирского в 40-летних культурах

| № варианта | Количество деревьев, шт./га | Горизонтальная проекция кроны, м |              | Высота до живой ветви, м | Протяженность живой кроны по стволу |    | Площадь горизонтальной проекции кроны, м <sup>2</sup> /га |
|------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------------------|----|---|
|            |                             | вдоль ряда                       | поперек ряда |                          | м                                   | %  |   |
| 1          | 176                         | 3,2±0,29                         | 3,3±0,31     | 1,3±0,26                 | 9,3±0,91                            | 88 | 1459,0  |
| 2          | 170                         | 1,9±0,22                         | 1,8±0,19     | 0,7±0,20                 | 2,9±0,26                            | 81 | 457,3   |
| 3          | 230                         | 1,8±0,21                         | 1,9±0,23     | 0,7±0,21                 | 3,4±0,18                            | 83 | 618,7   |
| 4          | 102                         | 1,7±0,19                         | 1,9±0,21     | 0,8±0,17                 | 2,7±0,22                            | 77 | 259,1   |

Состояние кроны расположенного под пологом естественного возобновления кедр сибирского без повреждения стволика существенно отличалось от состояния кроны деревьев на открытом месте. В большинстве случаев она имела асимметрию (была вытянута со стороны наибольшей освещенности). Сквозистость кроны превышала 60 %. Чередование ветвей последовательное, диаметр нижних скелетных ветвей в местах прикрепления к стволу не более 1,5 см. Охвоение редкое, пучки хвои имеются только на периферийной части ветвей. Окраска хвои светло-зеленая или зеленая.

Внешнее строение кроны деревьев кедр, поврежденных лосьями, как в окнах, так и под пологом резко отличается от строения кроны деревьев в предыдущих вариантах: особенности вносит многостольность, сокращая протяженность кроны с 81 до 77 % от высоты дерева. Вокруг каждого ствола образуется асимметричная каплевидная или овальная раскидистая крона, форму которой чаще определяют степень затенения и удаленность ветвей естественного возобновления, характер повреждения (слом стволика или «скусывание» ветвей) и кратность воздействия диких животных. Охвоение ветвей у кедров, произрастающих в окнах, более густое, цвет хвои – зеленый, под пологом охвоение слабое и лишь на концах ветвей, цвет хвои – светло-зеленый.

Основные таксационные показатели кедр сибирского в культурах по вариантам исследования приведены на рис. 2, откуда видно, что средняя высота деревьев без повреждения стволика, растущих в окнах и со слабым затенением с солнечной стороны, была в 2,5 раза больше, чем у деревьев с нормальным стволиком, но растущих под пологом (или в кроне) деревьев естественного возобновления.

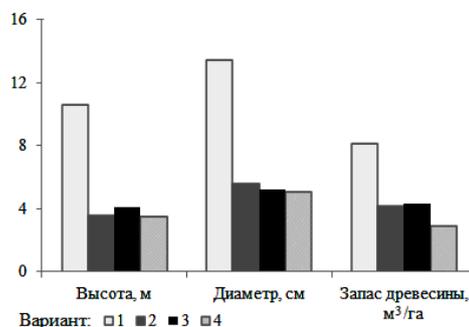


Рис. 2. Таксационные показатели кедр сибирского в 40-летних культурах по вариантам

Fig. 2. Forest inventory parameters of Siberian stone pine on the 40-year-old plantations by options

Различия по высоте хорошо видны и между произрастающими в окнах деревьями кедр сибирского с неповрежденным и поврежденным (лосьями) стволами. Различие между вариантами 1–4 достоверно ( $t_{\text{факт}} = 9,8-10,2 \geq t_{0,05} = 2,37$ ). Средний годовой прирост в варианте 1 составил

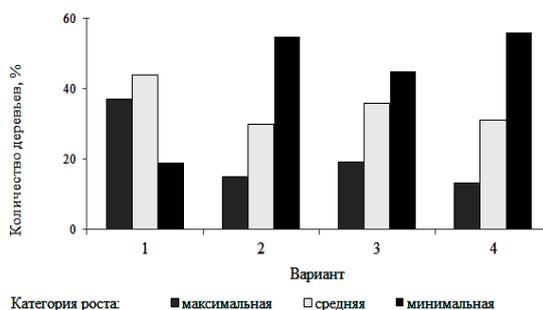
более 25 см, в вариантах 2–9, в вариантах 3–10 и в варианте 4 – менее 9 см. По высоте деревья 40-летних культур в варианте 1 соответствовали III классу бонитета; в остальных – классу Va.

Диаметр деревьев кедров сибирского в варианте 1 также имел достоверные различия с показателями деревьев из остальных вариантов ( $t_{\text{факт}} = 10,2 - 10,6 \geq t_{0,05} = 2,37$ ). Запас (сырорастущей) древесины составил: в 1-м варианте – 8,1 м<sup>3</sup>/га; во 2-м – 4,2; в 3-м – 4,3 и в 4-м – 2,9 м<sup>3</sup>/га. Следует отметить, что у кедров, находящихся под пологом естественного возобновления, диаметр ствола на высоте 1,3 м – около 5 см, а в верхней части на высоте 2,8–3,6 м он уменьшался от 1,5 до 1,0 см. Протяженность вершины с таким диаметром бывает 0,4...1,2 м.

Распределение 44-летних деревьев кедров сибирского в культурах первого класса возраста по категориям роста, представленное на рис. 3, свидетельствует о том, что в 1-м варианте доля деревьев максимального и среднего роста составляет 91 %, во 2-м – 44 %, в 3-м – 56 % и в 4-м – 43 %, деревья категории минимального роста – 9, 56, 44 и 57 % соответственно. В варианте 3 из-за угнетения деревьями естественного возобновления количество кедров категории максимального роста было в 2, а среднего – в 1,5 раза меньше по сравнению с 1-м вариантом. Переход деревьев кедров сибирского из категории среднего роста в категорию максимального роста в вариантах 2, 3 и 4 без своевременных лесоводственных мероприятий затруднен. Продолжающееся влияние деятельности лосей на кедр под пологом и на открытом месте еще более усугубляет положение в сформировавшемся насаждении.

Рис. 3. Распределение 44-летних деревьев кедров сибирского в культурах по категориям роста

Fig. 3. Distribution of 44-year-old Siberian stone pine plantation trees by growth categories



В варианте 3 произрастает наибольшее количество деревьев кедров сибирского (230 шт./га), у которых относительно целый, но очень тонкий стволик, особенно в верхней части, – прирост за последние 6–14 лет. При рубке ухода обычным способом (валка и удаление деревьев) данная часть ствола, освобожденная из крон нежелательных деревьев, наиболее подвержена искривлению до дугообразного состояния при налипании снега на пучки хвои (снеговалу). Эти кедров в дальнейшем переходят в отпад, поэтому, чтобы вершина после рубки деревьев естественного возобновления сохраняла устойчивое вертикальное положение, необходима технология ухода, значительно отличающаяся от традиционной. Она должна предусматривать оставление деревьев естественного возобновления усыхать на корню посредством окорки или инъекции химических препаратов (на водной основе) в стволы. Такие мероприятия известны, после их проведения отмирают надземная часть и корневая система одновременно.

Генеративные органы (завязь первого года, шишки) у кедра сибирского на участке 40-летних культур, созданных как орехоносное насаждение, не обнаружены. Начало плодоношения (семеноношения) у этого вида, по данным многих исследователей [5, 6, 9, 12, 14, 20], в сомкнутых естественных древостоях наступает в 40–50 лет, в разреженных насаждениях или на открытых участках – в 13–15 лет [8, 14, 23]. Образование генеративных органов в корнесобственных культурах кедра сибирского происходит в 17–25 лет [4, 14, 15, 17, 21]. На территории Свердловской области наиболее раннее появление шишек кедра выявлено нами (на других участках) в культурах 25-летнего возраста (биологический возраст деревьев – 29 лет). Единичные шишки расположены на вершинах самых больших деревьев в крайнем ряду с полным освещением кроны.

Благоприятные экологические условия способствуют активному росту ствола и развитию кроны деревьев естественного возобновления, которые полностью затеняют крону большинства исследуемых 44-летних кедров. В 1-м варианте их верхние части периодически затенены на 0,4–0,8 м вершинами больших деревьев естественного возобновления, а значительная часть кроны (не менее 4/5 по протяженности) – постоянно. Видимо, даже незначительное затенение верхней части кроны сдерживает генеративную способность кедра сибирского. Для интенсификации роста ствола кедра и особенно развития кроны требуется ее постоянная максимальная освещенность, что возможно лишь за счет усыхания крон всех деревьев естественного возобновления. Развитие мощных по размерам крон и высокой охвоенности деревьев кедра сибирского будет способствовать не только раннему образованию генеративных органов, но и обильной урожайности шишек, что и требуется от орехоносного насаждения [19, 22].

Оценка санитарного состояния 40-летних культур кедра сибирского показала, что из-за повреждения стволика большинство деревьев соответствуют II и III категориям, V отсутствует, VI представлена единично. На отдельных молодых ветвях сохраняется хермес сибирский (*Pineus cembrae* Chol.), который отмечен у исследуемого вида и в других регионах [7, 34].

Для предотвращения дальнейшего ухудшения состояния кедра сибирского на участке необходимо использовать рациональные технологические подходы к восстановлению ценных биологических ресурсов. Вместо существующей рубки деревьев естественного возобновления, основанной на удалении деревьев с кроной, следует применять их сохранение на корню в течение определенного времени посредством кольцевания или инъекции химическими препаратами на водной основе в стволы (возможны и другие способы). У таких деревьев корневая система и надземная часть отмирают одновременно, а поросль не образуется. В результате снизится привлекательность лесокультурного участка для диких животных, тем самым минимизируется вред, наносимый деревьям кедра сибирского.

Постепенное усыхание кроны деревьев естественного возобновления на всем участке снизит или полностью прекратит конкуренцию со стороны естественного возобновления за элементы почвенного питания. Возрастающая ажурность увеличит освещенность кроны кедров, находящихся в окнах с затенением и под пологом, поспособствует быстрейшей адаптации этих деревьев к новым условиям. Создание фитоценотического оптимума для кедра сибирского ускорит развитие ствола деревьев минимальной и средней категорий роста, сделает более быстрым выход вершины из зоны досягаемости для лосей.

Верхушечный побег кедрового сибирского, находящийся в кроне усыхающих естественных деревьев, будет в течение нескольких лет (2–3 года) защищен от снеговала окружающими отмершими ветвями. Усыхающая крона начнет уменьшаться за счет превращения мелких ветвей в опад, увеличится ее ажурность. Нарастающий поток солнечного света и отсутствие конкуренции за почвенное питание положительно повлияют на прирост всех частей кедрового, в т. ч. верхушечной, т. е. увеличат ее диаметр, что обеспечит ей устойчивое вертикальное положение. Развитие мощной по размерам и охвоению кроны ускорит образование генеративных органов у большинства деревьев кедрового, будет стимулировать урожайность шишек. Следующий лесоводственный уход не потребует длительного времени, что экономически выгодно.

### Заключение

Исследование участка 40-летних культур кедрового сибирского, созданного как орехоносное насаждение, позволило установить, что сохранность кедровых деревьев не превышала 31 % (678 шт./га). Среди них без повреждения ствола на открытом месте и под пологом естественного возобновления отмечено 406 шт./га (60 % от всех живых деревьев). Преобладающая часть кедров соответствует классу бонитета Va. Генеративные органы у изученных деревьев отсутствовали.

Фактором, снижающим сохранность и ухудшающим состояние кедрового сибирского на начальном этапе роста, является деятельность диких животных (лосей), привлекаемых порослью лиственных пород, появляющейся после рубок ухода традиционным способом, «на пень», и одновременно использующих охвоенную часть деревьев кедрового в качестве корма. На следующем этапе при отсутствии рубок ухода на кедровый сибирский негативно воздействуют возобновившиеся лиственные породы.

Для предотвращения дальнейшего ухудшения состояния культур кедрового сибирского требуется снятие напряженности в смешанном биоценозе. Для этого необходимы совершенно другие технологические решения – кольцевание или инъекция препаратов в стволы деревьев естественного возобновления, вызывающие усыхание на корню, что значительно уменьшает либо исключает появление поросли лиственных пород, тем самым снижает привлекательность этих участков для лосей и минимизирует их воздействие на кедр.

Усыхание всех сопутствующих деревьев резко изменит экологическую обстановку на участке: увеличится освещенность и улучшится почвенное питание деревьев кедрового, что обеспечит хороший рост корней, ствола, кроны и ускорит начало образования генеративных органов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреева Е.М., Терехов Г.Г., Стеценко С.К., Соловьев В.М., Фомин В.В. Лесоводственная и санитарная оценка культур кедрового сибирского первого класса возраста в Свердловской области // Естественные и технические науки. 2019. № 10(136). С. 172–176. Andreeva E.M., Terekhov G.G., Stetsenko S.K., Soloviev V.M., Fomin V.V. Forestry and Sanitary Assessment of Cedar Crops of the First Class Age in the Sverdlovsk Region. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences], 2019, vol. 10(136), pp. 172–176. DOI: <https://doi.org/10.25633/ETN.2019.10.26>

2. Бобров Р.В. Об улучшении ведения хозяйства в кедровых лесах в Российской Федерации в свете Постановления СМ СССР и РСФСР // Проблемы комплексного использования кедровых лесов. Томск: ТГУ, 1982. С. 38–50. Bobrov R.V. On Improving the Management of Cedar Forests in the Russian Federation in Connection with the Decree of the Council of Ministers in the USSR and the RSFSR. *Problems of the Integrated Use of Cedar Forests*. Tomsk, TSU Publ., 1982, pp. 38–50.
3. Болезни и вредители в лесах России. Т. 3. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / под общ. ред. Тузова В.К. М.: ВНИИЛМ, 2004. 200 с. *Diseases and Pests in the Forests of Russia*. Vol. 3. Methods for Monitoring Forest Pests and Diseases. Ed. by V.K. Tuzov. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 200 p.
4. Бродников С.Н., Лазарева С.М. Культуры сосны кедровой сибирской в лесах Среднего Поволжья // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование, 2016. № 3(31). С. 19–29. Brodnikov S.N., Lazareva S.M. Siberian Stone Pine in the Forests of Middle Volga Region. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2016, no. 3(31), pp. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2016.3.19>
5. Велисевич С.Н. Состояние мужской генеративной сферы сосны кедр сибирского на южной границе ареала в Западной Сибири // Лесоведение. 2016. № 4. С. 312–320. Velisevich S.N. Health of Male Reproductive Sphere of Siberian Pine at the Southern Limit in Western Siberia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2016, no. 4, pp. 312–320.
6. Горошкевич С.Н. Динамика роста и плодоношения кедр 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: <https://doi.org/10.17223/19988591/38/6>
7. Дроздов И.И., Дроздов Ю.И. Лесная интродукция. М.: МГУЛ, 2005. 134 с. Drozdov I.I., Drozdov Yu.I. *Forest Introduction*. Moscow, MSFU Publ., 2005. 134 p.
8. Земляной А.И., Барановский В.И. Особенности семеношения кедр сибирского на северной границе ареала // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 2-3. С. 183–186. Zemlyanoy A.I., Baranovskiy V.I. Features of Siberian Pine Seed Production on the Northern Border of the Range. *Hvojnyye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2007, vol. 24, no. 2-3, pp. 183–186.
9. Зубов С.А., Кирсанов В.А., Смолоногов Е.П., Петров М.Ф., Трусов П.Ф. Научные основы ведения хозяйства в кедровых лесах Урала // Рациональное использование лесов Урала и сохранение их средообразующей роли: тез. докл. к Свердлов. обл. науч.-техн. конф. Свердловск, 1976. С. 67–69. Zubov S.A., Kirsanov V.A., Smolonogov E.P., Petrov M.F., Trusov P.F. Scientific Basis of Management in Cedar Forests of the Urals. *Rational Use of Forests in the Urals and Preservation of Their Environment-Forming Role: Abstracts of Reports of the Sverdlovsk Regional Scientific and Technical Conference*. Sverdlovsk, 1976, pp. 67–69.
10. Калинин М.И. Корневедение. М.: Экология, 1991. 173 с. Kalinin M.I. *Root Science*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 173 p.
11. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области (практическое руководство). Свердловск: ИЭРиЖ УНЦ АН СССР, 1973. 176 с. Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Forest Site Conditions and Forest Types in the Sverdlovsk Region (Practical Guide)*. Sverdlovsk, IERiZh UNTs AN SSSR Publ., 1973. 176 p.
12. Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 216 с. Krylov G.V., Talantsev N.K., Kozakova N.F. *Cedar*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 216 p.

13. Лескова О.В., Христофорова Е.Ю., Карасева М.А. Рост культур кедр сибирского в биогрупповых посадках // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2007. Вып. 17. С. 63–66. Leskova O.V., Khristoforova E.Yu., Karaseva M.A. Growth of Cultures of a Cedar Siberian in Biogroup Landings Plantings. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2007, iss. 17, pp. 63–66.

14. Лесная энциклопедия: в 2 т. / гл. ред. Г.И. Воробьев. М.: Сов. энцикл., 1985. Т. 1. 564 с. *Forest Encyclopedia: In 2 Vol. Ed. by G.I. Vorob'yev. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1985, vol. 1. 564 p.*

15. Матвеева Р.Н., Милютин Л.И., Буторова О.Ф., Братилова Н.П. Отбор деревьев кедр сибирского высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 9–20. Matveeva R.N., Milyutin L.I., Butorova O.F., Bratilova N.P. Selection of High Reproductive Siberian Cedar Trees in the Geographic Seed Plantation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 2, pp. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.9>

16. Мерзленко М.Д., Коженкова А.А., Мельник П.Г. Рост хвойных интродуцентов в Западном Подмоскowie // Вестн. Алтайск. ГАУ. 2017. № 5(151). С. 86–90. Merzlenko M.D., Kozhenkova A.A., Melnik P.G. Growth of Introduced Coniferous Species in the Western Part of the Moscow Region. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2017, no. 5(151), pp. 86–90.

17. Некрасова Т.П. Биологические основы семеношения кедр сибирского. Новосибирск: Наука, 1972. 272 с. Nekrasova T.P. *Biological Basis of Siberian Pine Seeding*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. 272 p.

18. ОСТ 56-69–83. Площади пробные лесоустroительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИлесхоз, 1984. 60 с. *Industrial Standard. OST 56-69–83. Forest Inventory Test Sites. Laying out Method*. Moscow, TsBNTI Publ., 1984. 60 p.

19. Парамонов Е.Г., Башегуров В.К., Шевченко А.Н. Участие культур и подрост кедр в формировании орехоплодных плантаций // Вестн. Алтайск. ГАУ. 2007. № 3(29). С. 26–29. Paramonov Y.G., Bashegurov V.K., Shevchenko A.N. Role of Plants and Cedar Undergrowth in the Formation of Nut Bearing Plantations. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2007, no. 3(29), pp. 26–29.

20. Петров М.Ф. Кедр – дерево хлебное. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1982. 160 с. Petrov M.F. *Cedar is a Productive Tree*. Sverdlovsk, Sredne-Ural'skoye knizhnoye izdatel'stvo, 1982. 160 p.

21. Путенихин В.П., Путенихина К.В., Шигапов З.Х. Кедр сибирский в Башкирском Предуралье и на Южном Урале: биологические и лесоводственные особенности при интродукции. Уфа: Башкир. энцикл., 2017. 248 с. Putenikhin V.P., Putenikhina K.V., Shigarov Z.Kh. *Siberian Stone Pine in the Bashkir Cis-Urals and the Southern Urals: Biological and Forestry Features during Introduction*. Ufa, Bashkirskaaya entsiklopediya Publ., 2017. 248 p.

22. Сторожев В.П. Ретроспективный анализ семеношения и прироста кедр сибирского в национальном парке «Шушенский бор» // Сиб. экол. журн. 2007. № 1. С. 61–68. Storozhev V.P. Retrospective Analysis of Semiferous Characteristics and Growth of Siberian Cedar in the National Park “Shushensky Bor”. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2007, no. 1, pp. 61–68.

23. Танцырев Н.В. Лесоводственно-экологический анализ естественного возобновления кедр сибирского на сплошных гарях и вырубках в горных лесах Северного Урала: дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 215 с. Tantsyrev N.V. *Forestry and Ecological Analysis of Natural Siberian Stone Pine Renewal on Clear Burnt Areas and Cuttings in Mountain Forests of the Northern Urals: Cand. Biol. Sci. Diss. Yekaterinburg, USFEU, 2012. 215 p.*

24. Терехов Г.Г., Стеценко С.К., Андреева Е.М., Крюк В.И., Луганский В.Н. Особенности формирования чистых и смешанных культур кедр сибирского с сосной обыкновенной и елью сибирской на Среднем Урале // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 95–104. Terekhov G.G., Stetsenko S.K., Andreeva E.M., Kryuk V.I., Lugansky V.N. Peculiarities of Formation of Clean and Mixed Plantations of Siberian Cedar with Scots Pine and Siberian Spruce on Middle Urals. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 95–104. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5b24060e034156.02757256](https://doi.org/10.12737/article_5b24060e034156.02757256)
25. Чернов Н.Н., Митрофанов С.В. Лесные культуры кедр сибирского в восточноуральской лесостепи. Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. 140 с. Chernov N.N., Mitrofanov S.V. *Forest Plantations of Siberian Stone Pine in the Eastern Ural Forest Steppe*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2008. 140 p.
26. Critchfield W.B., Little E.L. *Geographic Distribution of the Pines of the World*. Washington, DC, USDA, 1966. 97 p. DOI: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.66393>
27. Eberchard J. Zur Frage der Naturverjüngung von *Pinus cembra* ssp. *sibirica* in der unteren Bergzone des Altai im Gebiet des Telezker Sees. *Archi Forstwesens*, 1966, B. 15, Nr. 5-6, S. 617–628.
28. Farjon A. *A Handbook of the World's Conifers*. In 2 Vol. Leiden-Boston, Brill, 2010. 1112 p. DOI: <https://doi.org/10.1163/9789047430629>
29. Hempel G., Jung E. Über Wachstum Struktur und des farnreichen sibirischen Lirbenkilfern-Mannen-Waldes (*Pinetum cembrae typikum dryopteridosum*). *Archiv Forstwesens*, 1968, B. 17, S. 753–780.
30. Jones P.D., Briffa K.R. Global Surface Air Temperature Variations during the Twentieth Century: Part 1. Spatial, Temporal and Seasonal Details. *The Holocene*, 1992, vol. 2, iss. 2, pp. 165–179. DOI: <https://doi.org/10.1177/095968369200200208>
31. Kharuk V.I., Im S.T., Oskorbin P.A., Petrov I.A., Ranson K.J. Siberian Pine Decline and Mortality in Southern Siberian Mountains. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 310, pp. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.042>
32. Krüssmann G. *Die Nadelgehölze*. Berlin, Verlag Paul Parey, 1979. 264 p.
33. Stecher J. *Die Zirbe (Pinus cembra L.). Beschreibung, Nutzung und Wissenschaftliche Bedeutung*. München, Grin Verlag GmbH, 2014. 32 p.
34. Steffan A.W. Zur Einschleppung und Ausbreitung der Fichtengallenläuse im Ammerländer Baumschulgebiet (Homoptera: *Adelgidae*). *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* [Journal of Applied Entomology], 1970, vol. 65, no. 3, pp. 345–357. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1970.tb03993.x>
35. Wong C.M., Daniels L.D. Novel Forest Decline Triggered by Multiple Interactions among Climate, an Introduced Pathogen and Bark Beetles. *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, iss. 5, pp. 1926–1941. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13554>

УДК 630\*52

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-69-78

**ТАБЛИЦЫ ОБЪЕМОВ СТВОЛОВ ПО РАЗРЯДАМ ВЫСОТ  
ИВЫ ДРЕВОВИДНОЙ СЕВЕРОТАЕЖНОГО РАЙОНА  
ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ***А.А. Парамонов, мл. науч. сотр., аспирант; ResearcherID: [ABH-7242-2020](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>**С.В. Третьяков, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>**С.В. Коптев, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>**А.П. Богданов, канд. с.-х. наук.; ResearcherID: [ABH-9399-2020](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>**И.В. Цветков, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAU-6441-2021](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>*

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, aleksandr\_bogd@mail.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 15.02.20 / Принята к печати 30.05.20

---

**Аннотация.** В целях повышения точности лесотаксационных работ созданы таблицы объема стволов по разрядам высот ивы древовидной северотаежного района европейской части Российской Федерации. Лесотаксационные нормативы для данного вида в северотаежном районе ранее не разрабатывались. При составлении разрядных объемных таблиц использовали предложенный И.И. Гусевым в 1971 г. для ельников европейского севера аналитический метод. В дальнейшем он нашел применение и при характеристике других древесных пород. Измерены диаметры и высоты деревьев на 41 пробной площади, заложенной в Верхнетоемском и Архангельском лесничествах Архангельской области, отобраны 105 модельных деревьев. В большинстве случаев пробные площади закладывали в смешанных насаждениях с преобладанием ивы. Полученные на пробных площадях данные служили для определения параметров разрядной шкалы. Источником сведений об объеме ствола ивы древовидной ранее были таблицы объема стволов осины. Проведен сравнительный анализ таблиц, составленных для стволов ивы древовидной, с таблицами по осине, взятыми из Лесотаксационного справочника по северо-востоку европейской части Российской Федерации. Показано значительное расхождение в шкалах для ивы и осины. Применение объемных разрядных таблиц осины при характеристике ивы приводит к систематическому завышению объемов древесины. Таблицы объемов стволов по разрядам высот ивы древовидной используются для определения запаса древостоя с применением данных перечета по 4-сантиметровым ступеням толщины. Разработанные таблицы отвечают требованиям производства. Объемные таблицы по разрядам высот используют для расчета запаса древесины при закладке пробных площадей, для установления размера ущерба при повреждении насаждений и других практических целей.

**Для цитирования:** Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Богданов А.П., Цветков И.В. Таблицы объемов стволов по разрядам высот ивы древовидной северотаежного района европейской части Российской Федерации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 69–78. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-69-78

---

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

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Рослесхоза 2018–2019 гг. «Разработка лесотаксационных нормативов для таксации чистых и смешанных насаждений ивы древовидной и рекомендаций по ведению в них хозяйства», регистрационный № НИОКР АААА-А18-118030290042-6.

**Ключевые слова:** разряды высот ивы, объем ствола ивы, ива древовидная, таблицы объемов стволов ивы, северотаежный район Европейской России.

## STEM VOLUME TABLES BY HEIGHT CLASSES OF WILLOW TREES IN THE NORTHERN TAIGA REGION OF THE EUROPEAN PART OF THE RUSSIAN FEDERATION

*Andrey A. Paramonov, Junior Research Scientist, Postgraduate Student;*

ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

*Sergey V. Tretyakov, Doctor of Agriculture, Prof.;* ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

*Sergey V. Koptev, Doctor of Agriculture, Prof.;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

*Aleksandr P. Bogdanov, Candidate of Agriculture;* ResearcherID: [ABH-9399-2020](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

*Iliya V. Tsvetkov, Candidate of Agriculture;* ResearcherID: [AAV-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: [vagner93@inbox.ru](mailto:vagner93@inbox.ru), [s.v.tretyakov@narfu.ru](mailto:s.v.tretyakov@narfu.ru), [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru), [aleksandr\\_bogd@mail.ru](mailto:aleksandr_bogd@mail.ru), [i.tsvetkov@narfu.ru](mailto:i.tsvetkov@narfu.ru)

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

---

**Original article** / Received on February 15, 2020 / Accepted on May 30, 2020

---

**Abstract.** In order to improve the accuracy of forest inventory works, tables of stem volume by height classes of willow trees in the northern taiga region of the European part of the Russian Federation were created. Forest inventory standards have not previously been developed for this species in the northern taiga region. The analytical technique proposed by I.I. Gusev in 1971 for spruce forests of the European North was used in compiling the height class volume tables. It was later adopted for the description of other tree species as well. Diameters and heights of trees were measured at 41 sample plots laid out in the Verkhnyaya Toyma and Arkhangelsk forestries of the Arkhangelsk region; 105 model trees were sampled. In most cases, sample plots were laid out in mixed plantations with the predominance of willow. The data obtained on the sample plots served to determine the parameters of the height class scale. The information source for stem volume of willow trees used to be the stem volume tables for aspen trees. A comparative analysis of the tables compiled for willow trees stems with the tables for aspen taken from the Forest Valuation Handbook for the Northeast of the European part of the Russian Federation was carried out. The analysis shows significant discrepancy in the scales for willow and aspen. The use of aspen height class volume tables for willow leads to a systematic overestimation of wood volumes. Tables of stem volumes by height classes of willow trees are used to determine stand stock with the enumeration data by 4-centimeter diameter classes. The developed tables meet the forest practice requirements. The volume tables by height classes are used to calculate timber reserves when laying out sample plots; to determine the damage level in case of stand damage; and for other practical purposes.

**For citation:** Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Bogdanov A.P., Tsvetkov I.V. Stem Volume Tables by Height Classes of Willow Trees in the Northern Taiga Region of the European Part of the Russian Federation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 69–78. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-69-78

**Funding:** The work is carried out within the state assignment of the Federal Forestry Agency for 2018–2019 “Development of Forest Inventory Standards for the Inventory of Pure and Mixed Willow Stands and Recommendations for Their Management”, Registration No. AAA-A18-118030290042-6.

**Keywords:** willow height classes, willow stem volume, willow trees, willow stem volume tables, northern taiga region of European Russia.

### Введение

Без актуальных лесотаксационных материалов невозможно планировать, использовать, защищать и изучать лесные ресурсы. Для ивы древовидной, произрастающей в таежной зоне европейской части Российской Федерации, таблицы объема стволов по разрядам высот ранее отсутствовали. При определении этого показателя применяли таблицы объемов стволов осины, что снижало точность лесотаксационных работ и послужило основанием для составления таких таблиц для ивы.

Цель исследования – разработка таблиц объемов стволов по разрядам высот ивы древовидной. Ивы рода *Salix* L. произрастают на всей территории России, их, по оценкам экспертов, более 130 видов, в Архангельской области примерно 30 видов [2, 8, 17]. Насаждения ивы в северотаежном лесном районе встречаются повсеместно. Ее важность в защите берегов, закреплении песков в поймах рек, зарастивании залежных и неиспользуемых земель, в т. ч. нарушенных техногенным воздействием, неоспорима. Чистые ивняки формируются в биотопах, пригодных только для произрастания ивы. В остальных случаях формируются смешанные насаждения, в которых ива в ряде случаев играет далеко не главную роль и выступает в виде небольшой примеси или уходит в подлесок. Ива имеет большое значение в повышении видового биоразнообразия насаждений европейской части России благодаря высокой внутривидовой изменчивости и образованию большого количества гибридов [8, 9, 17].

В северотаежном лесном районе большие площади земель имеют избыточное увлажнение. Сельское хозяйство считается на таких землях нецелесообразным или неэффективным по экономическим соображениям. Наиболее продуктивно на данных территориях растут ивы. Отсутствие лесотаксационных нормативов не позволяет вести научно обоснованное лесное хозяйство, поэтому были разработаны таблицы объемов стволов по разрядам высот ивы древовидной северотаежного района европейской части России.

Ива относится к быстрорастущим древесным породам. Она не создает больших запасов в насаждениях, подобно основным лесообразующим видам, может давать поросль как от пня, так и от корней и при благоприятных условиях превосходит многие древесные породы в росте в первые годы жизни. Особенно это проявляется у порослевых насаждений, поэтому в ряде стран ее применяют для получения мелкотоварной древесины с коротким оборотом хозяйства [14–16, 19–29]. Как пластичную древесную породу иву используют для зарастивания нарушенных техногенным воздействием и загрязненных участков [10].

Таблицы объема стволов по разрядам высот служат для вычисления запаса древостоя на основе данных перечета деревьев по диаметру и востребованы в производственной практике.

#### *Объекты и методы исследования*

Исследования проведены в ивовых насаждениях в Верхнетоемском и Архангельском лесничествах Архангельской области. На изучаемой территории наиболее часто встречались следующие виды ивы: ива северная (*Salix borealis* Fries.), ива козья (*Salix carpea* L.), ива трехтычинковая (*Salix triandra* L.) или их гибриды, нередко с другими видами ив.

Взято 105 модельных деревьев, а также заложена в соответствии с [13] 41 пробная площадь, осуществлены замеры диаметров и высот всех деревьев ивы и перечет деревьев остальных пород. Сбор полевого материала проводили в 2018–2019 гг. в период с мая по октябрь. Участки имели в составе не менее 3 единиц ивы древовидной или она являлась преобладающей породой. Стандарт предусматривает закладку прямоугольных и близких к ним по форме пробных площадей, ограниченных визирами. Кроме того, мы придерживались рекомендаций по закладке и таксации пробных площадей, представленных в методических указаниях [7, 11]. Замер диаметров деревьев выполняли в двух взаимно перпендикулярных направлениях (С–Ю и З–В) на высоте 1,3 м от шейки корня с точностью до 0,1 см. По среднему диаметру определяли площадь сечения дерева. Высоты измеряли высотомером у 10–15 модельных деревьев разной толщины для каждой породы.

При составлении разрядных и объемных таблиц мы опирались на общеизвестные закономерности строения однородных древостоев: средние деревья, имеющие одни и те же таксационные показатели (площадь сечения на высоте 1,3 м ( $g$ ), высоту ( $H$ ) и старое видовое число ( $f_{1,3}$ )), характеризуются одинаковыми средними объемами для отдельных ступеней толщины независимо от возраста, полноты, бонитета и других признаков самих древостоев [1, 3, 4].

Для получения разрядной шкалы ивы древовидной использован аналитический метод И.И. Гусева [5]. Метод является универсальным и подходит для построения разрядной шкалы различных древесных пород [18]. При этом строят графики высот по данным замеров на 42 пробных площадях. С графика высот для каждой ступени толщины снимают значения выровненных высот. Одну ступень берут за базовую, ее высоту принимают за единицу. Высоты остальных ступеней выражают в долях от высоты базовой ступени. Далее относительные высоты сводят в таблицу и вычисляют среднее значение и статистические показатели [6].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Для каждой пробной площади вычислены относительные высоты. В качестве базовой была взята высота ступени толщины 12 см. Средние относительные высоты и их статистические показатели, полученные на 41 пробной площади, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Средние относительные высоты ивы древовидной и статистические показатели меры связи по ступеням толщины**

| Статистические показатели                       | Ступени толщины  |                  |     |                  |                  |                  |                  |
|---|------------------|------------------|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|
|   | 4                | 8                | 12  | 16               | 20               | 24               | 28               |
| Количество единиц наблюдений                    | 27               | 41               | 41  | 31               | 16               | 14               | 9                |
| Среднее значение с основной ошибкой $M \pm m_M$ | 0,640±<br>±0,002 | 0,880±<br>±0,008 | 1,0 | 1,090±<br>±0,006 | 1,160±<br>±0,017 | 1,220±<br>±0,002 | 1,029±<br>±0,004 |
| Среднее квадратическое отклонение               | 0,103            | 0,048            | –   | 0,036            | 0,068            | 0,083            | 0,117            |
| Коэффициент изменчивости                        | 16,0             | 5,5              | –   | 3,3              | 5,9              | 6,8              | 9,1              |
| Точность опыта                                  | 3,0              | 0,8              | –   | 0,6              | 1,5              | 1,8              | 3,0              |
| Достоверность среднего значения                 | 32               | 116              | –   | 170              | 67               | 55               | 33               |

Средние относительные высоты выравнивают по аналитическому уравнению. Связь относительной высоты  $H_{\text{отн}}$  с диаметром на высоте груди  $D_{1,3}$ , см, характеризуется следующим образом:

$$H_{\text{отн}} = 0,1993 + 0,3222 \ln D_{1,3}.$$

Полученные расчетом значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Выровненные относительные высоты ивы древовидной**

| Диаметр              | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Относительная высота | 0,42 | 0,65 | 0,78 | 0,87 | 0,94 | 1,00 | 1,05 | 1,09 | 1,13 | 1,16 | 1,20 | 1,22 | 1,25 | 1,27 |

При разработке шкалы разрядов высот определяют количество разрядов, которое зависит от размаха предельных высот всех измеренных деревьев ивы древовидной. Между высотами базовой ступени различие должно быть 1,5–2,0 м. Предельные высоты берут по фактическим измеренным значениям диаметров и высот деревьев. На рис. 1 приведены предельные высоты по диаметрам в насаждениях у ивы древовидной в северотаежном лесном районе.

На рис. 1 видно, что в пределах крайних разрядов высот оказывается большая часть значений высот и диаметров деревьев на пробных площадях. Выровненные относительные высоты позволяют получить шкалу (табл. 3). Ее использовали для разработки таблицы объемов стволов.

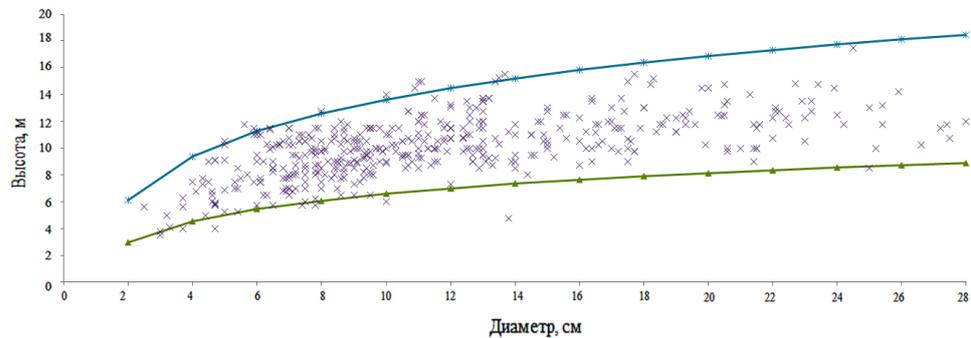


Рис. 1. Связь диаметров и высот в насаждениях ивы в северотаежном лесном районе

Fig. 1. Relationship between diameters and heights in willow stands in the northern taiga forest region

Таблица 3

### Шкала разрядов высот ивы древовидной северотаежного лесного района

| Диаметр на высоте<br>1,3 м, см | Высота по разрядам, м |           |           |          |
|--------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|
|                                | I                     | II        | III       | IV       |
| 2                              | 6,6–5,6               | 5,5–4,6   | 4,5–3,5   | 3,4–2,5  |
| 4                              | 10,2–8,6              | 8,5–7,0   | 6,9–5,3   | 5,2–3,7  |
| 6                              | 12,3–10,3             | 10,2–8,4  | 8,3–6,4   | 6,3–4,4  |
| 8                              | 13,7–11,5             | 11,4–9,4  | 9,3–7,2   | 7,1–5,0  |
| 10                             | 14,8–12,5             | 12,4–10,1 | 10,0–7,8  | 7,7–5,5  |
| 12                             | 15,8–13,3             | 13,2–10,8 | 10,7–8,3  | 8,2–5,8  |
| 14                             | 16,5–13,9             | 13,8–11,3 | 11,2–8,7  | 8,6–6,0  |
| 16                             | 17,2–14,5             | 14,4–11,8 | 11,7–9,0  | 8,9–6,2  |
| 18                             | 17,8–15,0             | 14,9–12,2 | 12,1–9,3  | 9,2–6,5  |
| 20                             | 18,4–15,5             | 15,4–12,6 | 12,5–9,7  | 9,6–6,8  |
| 22                             | 18,8–15,8             | 15,7–12,8 | 12,7–9,9  | 9,8–6,9  |
| 24                             | 19,3–16,2             | 16,1–13,2 | 13,1–10,1 | 10,0–7,0 |
| 26                             | 19,7–16,6             | 16,5–13,4 | 13,3–10,3 | 10,2–7,2 |
| 28                             | 20,0–16,9             | 16,8–13,7 | 13,6–10,5 | 10,4–7,3 |

Форму стволов ивы изучали по 105 модельным деревьям с применением старого видового числа, зависящего от высоты ствола. На практике удобнее брать не видовые числа, а видовые высоты, или произведение старого видового числа на высоту. Связь между видовой высотой и высотой ствола линейная. Установили зависимость видовых высот  $Hf_{1,3}$ , м, ивы древовидной от высоты, которая выражается линейным уравнением связи:

$$Hf_{1,3} = 1,6131 + 0,3545H.$$

Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,8659$ .

Объем ствола ивы древовидной ( $V$ ) по разрядам высот вычисляли при помощи формулы

$$V = \frac{\pi D_{1,3}^2}{40\,000} Hf_{1,3} = \frac{\pi D_{1,3}^2}{40\,000} (0,3545H + 1,6131).$$

Вычисленные значения объемов приведены в табл. 4.

Таблица 4

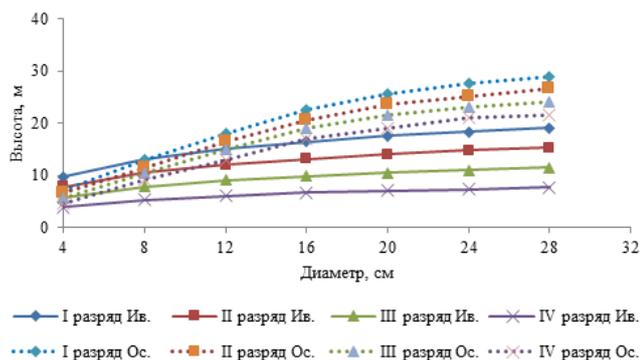
**Объемы стволов по разрядам высот ивы древовидной  
северотаежного лесного района**

| Диаметр на высоте 1,3 м, см | I         |                       | II        |                       | III       |                       | IV        |                       |
|-----------------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|
|                             | Высота, м | Объем, м <sup>3</sup> |
| 2                           | 6,1       | 0,0012                | 5,1       | 0,0011                | 4,0       | 0,0010                | 3,0       | 0,0008                |
| 4                           | 9,4       | 0,0062                | 7,8       | 0,0055                | 6,1       | 0,0047                | 4,5       | 0,0040                |
| 6                           | 11,3      | 0,0159                | 9,3       | 0,0139                | 7,4       | 0,0120                | 5,4       | 0,0100                |
| 8                           | 12,6      | 0,0310                | 10,4      | 0,0270                | 8,3       | 0,0230                | 6,1       | 0,0190                |
| 10                          | 13,6      | 0,0510                | 11,3      | 0,0440                | 8,9       | 0,0370                | 6,6       | 0,0310                |
| 12                          | 14,5      | 0,0760                | 12,0      | 0,0660                | 9,5       | 0,0560                | 7,0       | 0,0460                |
| 14                          | 15,2      | 0,1080                | 12,6      | 0,0940                | 10,0      | 0,0790                | 7,3       | 0,0650                |
| 16                          | 15,8      | 0,1500                | 13,1      | 0,1300                | 10,4      | 0,1100                | 7,6       | 0,0900                |
| 18                          | 16,4      | 0,1900                | 13,6      | 0,1600                | 10,7      | 0,1400                | 7,9       | 0,1100                |
| 20                          | 16,9      | 0,2400                | 14,0      | 0,2100                | 11,1      | 0,1700                | 8,2       | 0,1400                |
| 22                          | 17,3      | 0,2400                | 14,3      | 0,2100                | 11,4      | 0,1800                | 8,4       | 0,1400                |
| 24                          | 17,7      | 0,2500                | 14,7      | 0,2100                | 11,6      | 0,1800                | 8,6       | 0,1500                |
| 26                          | 18,1      | 0,2500                | 15,0      | 0,2200                | 11,9      | 0,1800                | 8,7       | 0,1500                |
| 28                          | 18,5      | 0,2600                | 15,3      | 0,2200                | 12,1      | 0,1900                | 8,9       | 0,1500                |

На рис. 2 для сравнения представлены шкалы разрядов высот ивы древовидной и осины. Показатели по осине на европейском севере России были взяты из Лесотаксационного справочника по северо-востоку европейской части Российской Федерации [12].

Рис. 2. Разряды высот ивы древовидной (Ив.) и осины (Ос.)

Fig. 2. Height classes of willow trees (solid line) and aspen (dotted lines)



Наблюдается существенное различие шкал разрядов высот ивы и осины, особенно для деревьев ступеней толщины 12 см и более. Сравним аналогичные значения объема и высоты стволов для I разряда высот ступени толщины осины и ивы древовидной 12 см. Высота и объем ствола осины составляют 18 м и 0,098 м<sup>3</sup> соответственно [12]; ивы древовидной – 14,5 м и 0,076 м<sup>3</sup> соответственно. Высота и объем ствола осины больше аналогичных показателей ивы древовидной на 3,5 м и 0,022 м<sup>3</sup> в абсолютных величинах и по относительной величине на

22 и 19 % соответственно. Это еще раз доказывает, что применение новых нормативов будет способствовать повышению точности таксации насаждений ивы древовидной в северотаежном районе европейской части Российской Федерации.

#### Заключение

На основе данных, полученных в ходе изучения 41 пробной площади и 105 модельных деревьев в Верхнетоемском и Архангельском лесничествах Архангельской области, для таежных лесов европейского севера России впервые разработаны таблицы разрядов высот стволов ивы древовидной. Использован аналитический метод, предложенный И.И. Гусевым. Метод позволяет при ограниченном объеме опытных материалов получить шкалу разрядов высот, отвечающую всем предъявляемым требованиям. Для составления таблицы установлена закономерная связь видовых высот с высотой ствола. Полученные таблицы повысят точность лесотаксационных работ, будут полезны для территориальных контролирующих органов лесного хозяйства, предприятий лесопромышленного комплекса, научно-исследовательских организаций и других организаций, выполняющих лесоустроительные и мониторинговые работы на европейском севере России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.
2. Анциферов Г.И. Ива. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 101 с. Режим доступа: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/iva/text.pdf> (дата обращения: 15.02.20). Antsiferov G.I. *Willow*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 101 p.
3. Верхунов П.М., Черных В.Л. Таксация леса. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. 398 с. Verkhunov P.M., Chernykh V.L. *Forest Inventory*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2007. 398 p.
4. Горский П.В. Руководство для составления таблиц. М.: Гослесбумиздат, 1962. 96 с. Gorskiy P.V. *Manual for Table Compiling*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 96 p.
5. Гусев И.И. Методика построения шкалы разрядов высот // Изв. вузов. Лесн. журн. 1971. № 6. С. 137–138. Gusev I.I. Methodology for Grading Height Classes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1971, no. 6, pp. 137–138. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1971/1971%20№%206.pdf>
6. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: АГТУ, 2002. 112 с. Gusev I.I. *Modeling of Ecosystems*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p.
7. Гусев И.И., Калинин В.И. Лесная таксация. Л.: ЛТА, 1988. 61 с. Gusev I.I., Kalinin V.I. *Forest Inventory*. Leningrad, LTA Publ., 1988. 61 p.
8. Демидова Н.А., Дуркина Т.М. Результаты испытания местных и интродуцированных видов рода *Salix* на Европейском Севере России // Науч. вед. БелГУ. Сер.: Естеств. науки. 2012. № 21. С. 23–29. Demidova N.A., Durkina T.M. Test Results of the Local and Introduced *Salix* Species in the European North of Russia. *Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya: Estestvennyye nauki* [Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences], 2012, no. 21, pp. 23–29.
9. Древесные породы мира. Т. 3. Древесные породы СССР / К.К. Калущкий, В.Г. Атрохин, Ф.Т. Тюриков; под ред. К.К. Калущкого. Лесн. пром-сть, 1982. 264 с. *Tree Species of the World*. Vol. 3. Wood Species of the USSR. Ed. by K.K. Kalutskiy, V.G. Atrokhin, F.T. Tyurikov. Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 264 p.
10. Дубас Р.Г., Бычков В.П. Экономико-технологические аспекты использования загрязненных радионуклидами лесных земель // Лесотехн. журн. 2013. № 3. С. 175–181.

Dubas R.G. Bychkov V.P. Economic and Technological Aspects of Use of Radionuclide Contaminated Forest Land. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2013, no. 3, pp. 175–181.

11. Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с. Zagreyev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. *All-Union Standards for Forest Valuation*. Moscow, Kolos Publ., 1992. 495 p.

12. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Федер. агентство лесн. хоз-ва, ФБУ «СевНИИЛХ»; сост. Войнов Г.С. и др. 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. ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИлесхоз, 1984. 60 с. *Industrial Standard. OST 56-69-83. Forest Inventory Test Sites. Laying out Method*. Moscow, TsBNTI Publ., 1984. 60 p.

14. Родькин О.И., Шкутник О.А. Особенности агротехники возделывания быстрорастущей ивы для производства возобновляемого биотоплива // Экол. вестн. 2015. № 3(33). С. 62–68. Rodkin O.I., Shkutnik O.A. The Specification of Agricultural Methods of Fast Growing Willow Production for Renewable Biomass. *Ekologicheskii Vestnik*, 2015, no. 3(33), pp. 62–68.

15. Родькин О.И., Орлович С., Крстић В., Пилиповић А. Особенности водного режима культивируемых клонов быстрорастущей ивы *Salix viminalis* и *Salix alba* // Вестн. ИрГСХА. 2013. № 58. С. 69–77. Rodkin O.I., Orlovich S., Krstich B., Pilipovich A. Features of Water Regime of Cultivated Clones of Fast Growing Osiers *Salix viminalis* and *Salix alba*. *Vestnik IrGSHA*, 2013, no. 58, pp. 69–77.

16. Родькин О.И., Вайцехович Н.Н., Шкутник О.А., Орлович С., Крстић В., Клашња В., Пилиповић А., Ковачевић В. Использование адаптивных клонов как фактор эффективного внедрения энергетических плантаций быстрорастущей ивы // Вестн. ИрГСХА. 2013. № 56. С. 46–54. Rodkin O.I., Vaitcekhovich N.N., Shkutnik O.A., Orlovich S., Krstich B., Klashnja B., Pilipovich A., Kovačević B. Adaptive Clones Usage as a Factor of Effective Introduction of Fast Growing Willow Energy Plantation. *Vestnik IrGSHA*, 2013, no. 56, pp. 46–54.

17. Скворцов А.К. Ивы СССР. М.: Наука, 1968. 262 с. Skvortsov A.K. *Willows of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 262 p.

18. Третьяков С.В., Коптев С.В., Богданов А.П., Ильинцев А.С., Демиденко С.А., Тимофеева А.В. Лесотаксационные нормативы для определения объема стволов ольхи серой *Alnus incana* L. по разрядам высот // Сиб. лесн. журн. 2017. № 3. С. 81–86. Tret'yakov S.V., Koptev S.V., Bogdanov A.P., Il'intsev A.S., Demidenko S.A., Timofeeva A.V. Forest Inventory Standards for Determination of the Grey Alder *Alnus incana* L. Stem Volumes by the Height Grades. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2017, no. 3, pp. 81–86. DOI: <https://doi.org/10.15372/sjfs20170308>

19. Abrahamson L.P., Volk T.A., Kopp R.F., Ballard J.L. *Willow Biomass Producer's Handbook*. Syracuse, USA, State University of New-York, 2002. 31 p.

20. Dimitriou I., Rosenqvist H. Sewage Sludge and Wastewater Fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for Increased Bioenergy Production – Biological and Economic Potential. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35, iss. 2, pp. 835–842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.010>

21. Gommers A., Goor F., Thiry Y., Vandenhove H. *RECOVER – Relevancy of Short Rotation Coppice Vegetation for the Remediation of Contaminated Areas*. SCK·CEN Reports, no. BLG-826. Mol, Belgium, Studiecentrum voor Kernenergie, 1999. 63 p.
22. *Greenbook 2002. Sustaining People, Land and Communities*. St. Paul, MN, Minnesota Department of Agriculture, 2002. 75 p.
23. Labrecque M., Teodorescu T.I. High Biomass Yield Achieved by *Salix* Clones in SRIC Following Two 3-Year Coppice Rotations on Abandoned Farmland in Southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 25, iss. 2, pp. 135–146. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00192-7)
24. *Renewable Energy*. Ed. by T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reggy, R. Williams, L. Burnham. Washington, DC, Island Press, 1993. 1160 p.
25. Rydén L., Migula P., Andersson M. *Environmental Science: Understanding, Protecting and Managing the Environment in the Baltic Sea Region*. Uppsala, The Baltic University Press, 2003. 824 p.
26. Weih M., Dimitriou I. Environmental Impacts of Short Rotation Coppice (SRC) Grown for Biomass on Agricultural. *BioEnergy Research*, 2012, vol. 5, iss. 3, pp. 535–536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9230-2>
27. Why Willow? *Materials of the Site of the Renewable Energy Growers Ltd*. Available at: <http://www.energycrop.co.uk/pages/willow.html> (accessed 20.05.20).
28. *Willow Varietal Identification Guide*. Ed. by B. Caslin, J. Finnan, A. McCracken. Oak Park, Carlow, Teagasc, 2012. 65 p. Available at: [https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2012/Willow\\_Identification\\_Guide\\_2012.pdf](https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2012/Willow_Identification_Guide_2012.pdf) (accessed 17.05.20).
29. *World Energy Assessment Overview: 2004 Update*. Ed. by J. Goldemberg, T.B. Johansson. New York, UNDP, 2004. 86 p.

УДК 630\*8

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-79-88

## ТЕХНОЛОГИЯ ВОСПРОИЗВОДСТВА ПИХТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ХВОЙНОЙ ЛАПКИ

*Е.М. Царев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>*

*К.П. Рукомойников, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>*

*С.Е. Анисимов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-1346-2020](https://orcid.org/0000-0003-3332-0927).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>*

*Д.С. Татаринев, аспирант; ResearcherID: [AAB-7031-2020](https://orcid.org/0000-0002-3312-796X).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3312-796X>*

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,  
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: CarevEM@volgatech.net,  
RukomojnikovKP@volgatech.net, AnisimovSE@volgatech.net, denistatarinov4@mail.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 28.02.20 / Принята к печати 23.06.20

---

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы использования инновационных технологий в лесозаготовительной отрасли. Производство продукции «для здоровья», если грамотно подойти к делу и выбрать низкоконкурентную нишу, может приносить значительную прибыль. На сегодняшний день остаются виды производств, где конкуренция, несмотря на высокий спрос, минимальная. К ним можно отнести промышленное производство пихтового масла. Пихтовое масло популярно у потребителей. Оно славится своими целебными свойствами и применяется при простудных заболеваниях, проблемах с желудочно-кишечным трактом и суставами, при нервных расстройствах, используется в косметологии и в производстве лечебных препаратов (мазей и кремов). Однако существует ряд законодательных ограничений, связанных с организацией производства пихтового масла. Это касается заготовки сырья. Доля пихтовых насаждений в составе лесов постоянно уменьшается. В европейской части России возникла необходимость в поиске способов обеспечения бесперебойного снабжения предприятий, выпускающих пихтовое масло, необходимым сырьем. Предложен один из возможных подходов к решению вопроса путем искусственного воспроизводства пихтовых насаждений с целью их дальнейшего использования при производстве пихтового масла. Рекомендован периодически повторяющийся цикл, позволяющий изготавливать пихтовое масло там, где заложена пихтовая плантация. Также разработана конструкция устройства, помогающего сократить время на посадку, уменьшить нагрузки на людей при формировании посадочного места и за счет этого повысить производительность труда. Материалы статьи могут служить для арендующих землю под выращивание пихты в целях изготовления масла руководством по эффективному использованию производственных ресурсов: людей и техники.

**Для цитирования:** Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов С.Е., Татаринев Д.С. Технология воспроизводства пихты для получения хвойной лапки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 79–88. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-79-88

**Ключевые слова:** инновации, лесные культуры, пихтовые насаждения, лесовосстановление, пихтовое масло.

## FIR REPRODUCTION TECHNOLOGY FOR HARVESTING CONIFEROUS BOUGHS

*Evgeny M. Tsarev*, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

*Konstantin P. Rukomojnikov*, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

*Sergey E. Anisimov*, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-1346-2020](https://orcid.org/0000-0003-3332-0927).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>

*Denis S. Tatarinov*, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAB-7031-2020](https://orcid.org/0000-0002-3312-796X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3312-796X>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: CarevEM@volgatech.net, RukomojnikovKP@volgatech.net, AnisimovSE@volgatech.net, denistatarinov4@mail.ru

---

Original article / Received on February 28, 2020 / Accepted on June 23, 2020

---

**Abstract.** The article considers the use of innovative technologies in logging industry. Manufacture of products “for health” can turn into a substantial profit if one approaches the business competently and chooses a low-competitive niche. Nowadays, there are still types of industries where competition is minimal, despite high consumer demand. These include the industrial production of fir needle oil, which is popular with consumers. It is famous for its healing properties and is used in treating colds, intestinal issues, joints, and nervous disorders; in the manufacture of cosmetics and medicines (ointments and creams). However, there are a number of issues related to the organization of the fir needle oil production, which are the basis of legislation in this area. This applies to the harvesting of raw materials. The share of fir stands in the composition of forests is constantly decreasing. In the European part of Russia, it became necessary to find a way to ensure a regular supply of fir needle oil enterprises with the necessary raw materials. The article proposes a new technology for the artificial reproduction of fir plantations for the purpose of their further use in the production of fir needle oil. A periodic cycle, which allows producing fir needle oil wherever a fir plantation is laid out, is recommended. The design of the device has also been developed. It helps to reduce the planting time, the loads on people when forming the planting spot and thereby increase labor productivity. The article materials can serve as a guide for the efficient use of production resources (people and machinery) for those who lease land for fir growing for oil production. **For citation:** Tsarev E.M., Rukomojnikov K.P., Anisimov S.E., Tatarinov D.S. Fir Reproduction Technology for Harvesting Coniferous Boughs. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 79–88. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-79-88

**Keywords:** innovations, forest plantations, fir stands, reforestation, fir needle oil.

### Введение

Пихта – одна из ближайших родственниц ели. Пихтовые леса широко распространены на северо-востоке европейской России, но основная их часть сосредоточена в таежной зоне Сибири, в частности на юге Томской и Кемеровской областей, на Алтае, в Саянах и на юге Дальнего Востока. Кроме того, пихтовые леса есть на Северном Кавказе и в Закавказье, иногда встречаются в Карпатах. В Среднем Поволжье пихтовые леса занимают 10,5 тыс. га, что составляет 0,11 % покрытой лесом площади. На Дальнем Востоке такие леса образуют пихта цельнолистная, или черная, а также пихта белокорая, растущие

совместно с елью саянской и другими породами. При этом участие пихтовых лесов в составе древостоев ряда регионов постоянно уменьшается.

Чаще всего пихту используют в качестве источника сырья для фармакологической и лесохимической промышленности [1, 2, 5, 9, 13, 16]. К дополнительным возможностям промышленного использования пихты относится добывание с растущих деревьев ценных веществ, которые содержатся в хвое и коре, главным образом эфирных масел, витамина С и пихтового бальзама [9, 17, 18, 21–24].

Эфирные масла находят применение в различных отраслях. Их используют в медицинских целях, в парфюмерии и косметологии, в производстве продуктов питания [20]. Объем продаж пихтовых масел в России за 2010–2014 гг. поднялся на 94,9 % и в 2014 г. составил 2304,5 млн р., прогнозируется дальнейший рост показателя. Рост прибыли в большей степени объясняется тем, что становится выше средняя цена продукта на рынке [8].

Одним из проблемных и трудоемких процессов при производстве пихтового масла является заготовка сырья. Согласно статье 27 Лесного кодекса РФ существует ряд ограничений на заготовку пихтовой, сосновой и еловой лапки. Заготовка разрешается только со срубленных деревьев на лесосеках при проведении выборочных и сплошных рубок [6, 13], а также со стоящих деревьев – так называемая остижка, при которой остигаются концы веток длиной 30–40 см у деревьев 10–15 см в диаметре. При этом оговорены и сроки стрижки: не более 1 раза в 4–5 лет.

Пихтовую лапку можно собирать на протяжении всего года. Однако следует учесть, что в зимний период вследствие низких температур определенное количество хвои опадает во время заготовки, погрузка в транспорт также обуславливает на потерю пихтовой хвои, поэтому выход сбора значительно ниже [10, 12, 19].

Пихта не занимает столь почетного места в эксплуатации леса, как другие хвойные породы, по причине того, что ее древесина не обладает таким же высоким качеством. Кроме того, в европейской части России не встречаются чистые древостои пихты. Сбор и транспортировка сырья для производства пихтового масла являются высокочрезвычайно затратными, т. к. производятся с огромных территорий. Существуют серьезные проблемы с заготовкой и доставкой сырья в виде пихтовой лапки на перерабатывающие предприятия [14].

Предлагается один из вариантов искусственного воспроизводства пихты для получения пихтовой лапки и продукции на ее основе. Цель – разработка методического подхода к проектированию пихтовых лесных насаждений, перспективных для непрерывного лесопользования при производстве пихтового масла с условием, что данное масло будет производиться там, где заложена пихтовая плантация; и конструкции устройства для посадки контейнеризированных саженцев, которая позволит улучшить качество посадки и повысить производительность труда.

#### *Объекты и методы исследования*

Предлагаемая технология предусматривает проведение всего цикла работ, связанных с выполнением лесозаготовительных и лесовосстановительных мероприятий, с производством пихтового масла, на единой территории.

Первым и самым важным этапом в данной технологии является оформление лесного участка в аренду. Оно осуществляется на основании статьи 46 Лесного кодекса РФ. Использование лесов для переработки древесины и иных лесных ресурсов представляет собой предпринимательскую деятельность, связанную с производством изделий из древесины и иной продукции такой переработки в соответствии со статьей 14 Лесного кодекса РФ [6]. После оформления участка в аренду составляется технологическая карта на его освоение. Участок разбивается на 10 равных лесосек (рис. 1), каждую из которых предполагается осваивать поочередно в течение десяти лет.

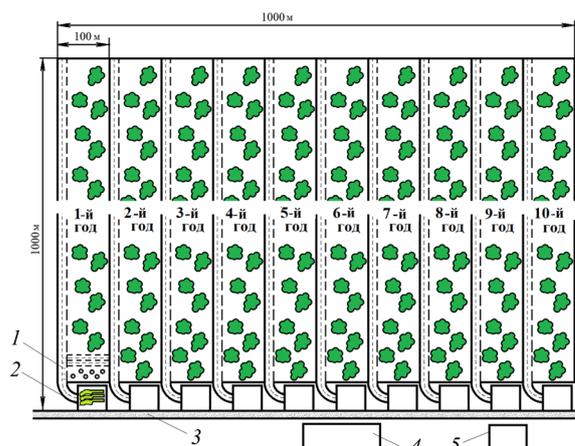


Рис. 1. Схема разбивки квартала на лесосеки: 1 – пасечный волок; 2 – погрузочный пункт; 3 – бригадный домик; 4 – площадка для переработки хвойной лапки; 5 – лесовозный ус

Fig. 1. Scheme of dividing the forest quadrant into cutting areas: 1 – skid trail; 2 – loading point; 3 – brigade hut; 4 – site for processed coniferous boughs; 5 – haul road feeder

В первый год на первом участке осуществляют сплошную рубку и вывозят все заготовленные лесоматериалы. Система используемых при этом машин показана на рис. 2, а.



Рис. 2. Комплекс работ, проводимых на арендованном участке

Fig. 2. Set of works carried out on the leased forest area

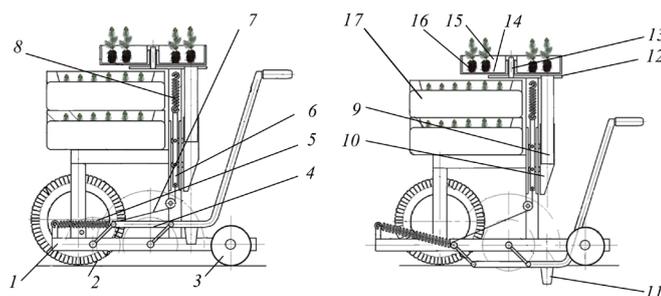
По завершении лесосечных работ продолжается освоение территории. Осуществляются корчевка пней, вспашка земли, дальнейшее ее фрезерование. Система машин для проведения этих операций представлена на рис. 2, б.

После данного этапа работ освоенный участок не трогают до осени. Осенью обрабатывают почву и высаживают саженцы. Возможно использовать посадочный материал с закрытой корневой системой, который имеет более высокую приживаемость, лучший рост в первые годы, большую устойчивость на площадях с экстремальными лесорастительными условиями. Посадку разрешается осуществлять в течение всего безморозного периода, что позволяет равномерно распределить энергетические и трудовые ресурсы [3].

При этом предлагается использовать специальное устройство (рис. 3) [11]. Его конструкция следующая. На П-образную раму 1 спереди установлены два колеса 2, а сзади два прижимных вальца 3. Между колесами и вальцами находится пантограф 4, который закреплен шарнирами на раме. Спереди пантографа смонтирована пружина 5 его привода, один из ее свободных концов связан с рамой, а второй – с пантографом с помощью ползуна 6 и троса 7. Сверху ползун зафиксирован направляющей пружиной 8, а сбоку находится полая трубка 9 с удлинителем 10. Сзади пантографа размещен рабочий орган 11 в виде полого усеченного конуса. Сверху П-образной рамы расположен круглый стол 12, на нем находится распределитель 13 с круглым диском 14 и секторами 15, связанными с отверстием полой трубки.

Рис. 3. Устройство для высадки саженцев с закрытой корневой системой

Fig. 3. Device for planting ball-rooted seedlings



Устройство используется так. На распределителе в виде круглого диска с секторами укладываются саженцы 16 из контейнеров 17, которые расположены на раме. Пантограф с рабочим устройством 11 под воздействием приложенной силы стремится вниз, пружина привода пантографа растягивается, направляющая пружина сжимается, а при движении пантографа в обратную сторону пружины меняют направление. В результате получается лунка. После того как пантограф возвратится в первоначальное положение, происходит выдвижение удлинителя. Круглый диск с саженцами поворачивают вручную до того положения, когда один из саженцев повернется до области, где находится отверстие полой трубки. После этого саженец по трубке попадает в лунку, затем будет произведен переход на следующую позицию. При этом два прижимных вальца придавливают саженец в лунку и цикл повторяется. Данный этап работ показан на рис. 2, в. Схема посадки саженцев приведена на рис. 4.

В качестве посадочного материала могут использоваться саженцы различных видов пихты. Крона деревьев этой породы имеет ширококоническую форму и очень плотная. Годовой прирост – более 30 см. Высота к 10 годам – до 4 м. Ветви отрастают от ствола почти горизонтально. Хвоя длиной 5–7 см, серебристо-голубоватая, с обеих сторон одинаково окрашенная, аркообразно изогнутая. Шишки крупные, появляются на 20-летних деревьях. В зависимости от лесорастительной зоны, фактора, влияющего на скорость роста пихты,

возможна корректировка технологии, предусматривающая изменение временных интервалов выполнения работ на лесных плантациях. При этом желательно, чтобы почва была кислая или слабокислая, умеренно влажная.

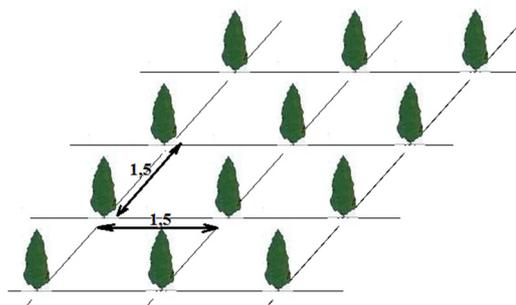


Рис. 4. Схема посадки саженцев пихтового насаждения

Fig. 4. Scheme for planting seedlings of a fir stand

После завершения работ на первой лесосеке, бригада переходит на вторую, где выполняет весь комплекс мероприятий, проводимых ранее на первой лесосеке. В такой же последовательности в течение десяти лет проводят работы на остальных лесосеках. Параллельно осуществляется уход за ранее посаженными насаждениями (рис. 2, з). В целях противодействия затемнению лесных культур малоценной лиственной порослью проводят сплошное или частичное удаление нежелательной растительности на территории пихтовых плантаций. Подобный уход необходим во всех возрастных группах каждый год. При механизированном варианте ведения работ осветления можно осуществлять с использованием ручного кустореза «Секор-3», кустореза КОМ-2,3 или катка-осветлителя типа КОК-2. При химическом варианте ведения аналогичных работ применяют арборициды.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Проведем анализ ситуации на каждой из 10 лесосек, выделенных для воспроизводства пихты, по результатам 10-летнего периода эксплуатации лесного участка. В первый год освоена крайняя левая лесосека. В течение десяти лет на ней, согласно методике, проводились работы. К завершению анализируемого периода пихтовые насаждения уже достигли 10-летнего возраста, а, следовательно, имели необходимую зрелость и были пригодны для переработки и производства масла (1-й год, рис. 5). На второй лесосеке, рубка леса на которой осуществлялась на второй год работы, пихтовые насаждения к десятому году эксплуатации участка достигли лишь 9-летнего возраста, еще не готовы к сбору пихтовой лапки и по-прежнему нуждаются в уходе. Такие же виды работ проведены и на остальных 8 лесосеках (в период с третьего по восьмой годы лесопользования). На лесосеке, эксплуатация которой началась на девятый год работы, к анализируемому году необходимы подготовка к посадке, посадка и прополка. При этом в анализируемый год на крайней правой, последней десятой лесосеке, на которой лесосечные работы еще не проводились, потребуется выполнить валку, трелевку и вывоз древесины, а также корчевку, вспашку и фрезерование почвы.

Последний этап работ, представленный на рис. 2, д, начинается с заготовки пихтового древостоя. Валка осуществляется при помощи бензиномоторных пил. Поваленный древостой складывается в небольшие кучи, которые грузятся вручную в тракторную тележку и отправляются к месту базировки агрегата для производства пихтового масла.

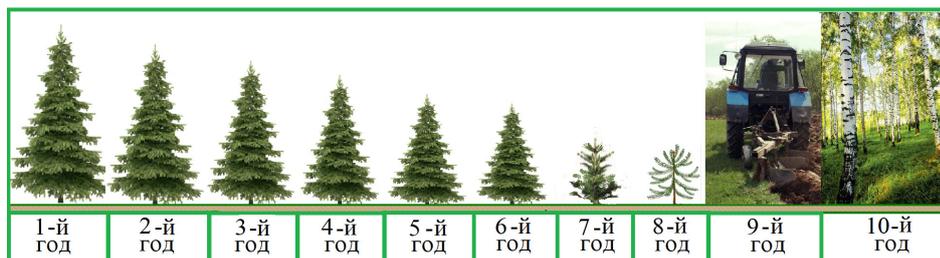


Рис. 5. Вид плантации после 10 лет освоения (номер года по порядку – год начала работы)

Fig. 5. Forest plantation after ten years of utilization (the year number in order – the year of work commencement)

Цех для получения пихтового масла целесообразно разместить на самой лесосеке, вследствие чего исключаются потери хвойной лапки, в отличие от варианта ее доставки на лесопромышленный склад, когда потери сырья будут составлять до 30 % от его общего объема [12, 15].

После того, как все пихтовые деревья убраны, производят зачистку территории, как это представлено на рис. 2, б, в. Затем бригада переходит на вторую лесосеку. При этом производят переработку пихтовой лапки.

По истечении десяти лет, когда работы будут выполняться на десятой лесосеке, пихтовый древостой на первой лесосеке достигнет зрелости и будет являться пригодным для производства пихтового масла. Такое сырье может перерабатываться полностью, т. е. вместе с хвойной лапкой сразу после соответствующего измельчения перерабатывается и сам ствол [7, 11].

Заготовку древесной зелени можно проводить в любое время года, ее хранение необходимо осуществлять согласно ГОСТ 21769–84 насыпью. Требуемая высота насыпи – не более 1,0 м. Срок хранения должен соответствовать указанному в таблице [4, 25].

#### Сроки хранения древесной зелени

| Древесная зелень | Срок хранения, сут, не более, при температуре |           |
|------------------|---|-----------|
|                  | плюсовая                                      | минусовая |
| Хвойная          | 1   | 5         |
| Лиственная       | 1   | –         |

Если срок хранения не будет выдержан, качество сырья снизится. Производственная линия получения пихтового масла представлена на рис. 6, где 1 – пихтовая лапка; 2 – самоходное шасси (подборщик); 3 – измельчитель; 4 – пихтоварка; 5 – продукция переработки.

Технологический процесс производства пихтового масла занимает около 16 ч. В работе задействовано 2 человека. Для получения 1 л чистого продукта требуется 100 кг сырья и 50 кг водного пара. Согласно предложенной технологии, пихтовая лапка перерабатывается во время одной смены, что указывает на перспективность развития этого направления. Производство пихтового масла осуществимо в течение всего года, а работа пихтоварной установки может обеспечиваться за счет использования в качестве топлива отходов лесосечных работ [12, 14, 21].



Рис. 6. Технологическая схема производства пихтового масла-сырца и переработки зелени в хвойно-витаминную муку

Fig. 6. Technological scheme of raw fir needle oil production and processing of greenery into coniferous vitamin flour

### Заключение

Методический подход к воспроизводству пихты для получения пихтовой лапки и продукции на ее основе, базирующийся на периодическом повторении цикла работ, позволяет организовать безостановочное поступление сырья в переработку и производить пихтовое масло непосредственно на месте закладки пихтовой плантации.

Для увеличения производства рекомендуется взять в аренду не один, а несколько участков, что дает возможность эффективно загрузить используемую технику и вовлеченных в работу людей.

Предложенная конструкция устройства для высадки посадочного материала позволит сократить время на поднос саженцев, улучшить качество данных работ путем уменьшения усилий, необходимых для формирования посадочного места, и за счет этого повысить производительность труда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Vais A.A.* Регрессионная оценка фитомассы хвои в пихтовых древостоях Средней Сибири // *Международ. журн. эксперим. образования*. 2015. № 11-2. С. 304. *Vais A.A.* Regression Assessment of Coniferous Phytomass in Fir Stands of Middle Siberia. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya* [International Journal of Experimental Education], 2015, no. 11-2, p. 304.

2. *Vais A.A.* Оценка строения фитомассы хвои пихтовых древостоев с учетом нормативно-справочных данных (на примере насаждений Сибири) // *Хвойные бореальной зоны*. 2018. Т. 36, № 2. С. 140–147. *Vais A.A.* Fir Forest Stands Acerous Leaf Phytomass Structure Assessment of Taking into Account Standard and Help Data (Plantings of Siberia Were Taken as an Example). *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2018, vol. 36, no. 2, pp. 140–147.

3. Выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой // Зооинженерный факультет МСХА. Неофициальный сайт. Режим доступа: <https://www.activestudy.info/vyrashhivanie-posadochnogo-materiala-s-zakrytoj-kornevoj-sistemoj> (дата обращения: 25.12.19). Cultivation of Ball-Rooted Planting Material. *Unofficial Website of the Zooengineering Faculty of the Moscow Agricultural Academy*.

4. ГОСТ 21769–84. Зеленъ древесная. Технические условия: дата введения 1985-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с. *State Standard. GOST 21769–84. Tree Verdure. Specifications*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1984. 7 p.

5. Гуков Г.В., Гриднев А.Н., Гриднева Н.В. Пихта цельнолистная в Приморском крае (современное состояние, проблемы искусственного лесоразведения) // Успехи современного естествознания. 2017. № 10. С. 29–34. Gukov G.V., Gridnev A.N., Gridneva N.V. Manchurian Fir in Primorskiy Krai (Current State, Problems of Afforestation). *Uspekhi sovremenno-go estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2017, no. 10, pp. 29–34.

6. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ. М.: ИНЭКО, 2006. *Forest Code of the Russian Federation Dated December 4, 2006 No. 200-ФЗ*. Moscow, INEKO Publ., 2006.

7. Лобанов В.В., Степень Р.А. Влияние технологических факторов на выход и состав пихтового масла // ИВУЗ. Химия и химическая технология. 2006. Т. 49, вып. 9. С. 71–74. Lobanov V.V., Stepen' R.A. Influence of Technological Factors on the Yield and Composition of Spruce Oil (Silver Fir Oil). *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya* [Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology], 2006, vol. 49, iss. 9, pp. 71–74.

8. Анализ рынка эфирных масел в России в 2010–2014 гг., прогноз на 2015–2019 гг. // Официальный сайт АО «РосБизнесКонсалтинг». Режим доступа: <https://marketing.rbc.ru/research/28153/> (дата обращения: 30.01.19). Analysis of the Market of Essential Oils in Russia in 2010–2014, Forecast for 2015–2019. *Official Website of the RBC Group*.

9. Панькив О.Г., Демина Л.Н., Паршикова В.Н., Степень Р.А. Эффективность переработки древесной зелени пихты различными методами // Фундаментальные исследования. 2012. № 1. С. 168–171. Pankiv O.G., Demina L.N., Parshikova V.N., Stepen R.A. Efficiency of Processing of Wood Greens of the Fir Various Methods. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2012, no. 1, pp. 168–171.

10. Патент 2437925 РФ, МПК С11В 9/02. Установка для обработки зелени пихты: № 2010123612/12: заявл. 09.06.2010: опубл. 27.12.2011 / В.Н. Невзоров, В.А. Самойлов, Т.В. Невзорова, А.И. Ярум. Nevzorov V.N., Samojlov V.A., Nevzorova T.V., Jarum A.I. *Silver Fir Branches Processing Plant*. Patent RF no. RU 2437925 C1, 2011.

11. Патент 2673743 РФ, МПК А01С 5/02. Ручное устройство для образования лунок под посадку контейнеризированных семян: № 2017146143: заявл. 27.12.2017: опубл. 29.11.2018 / Е.М. Царев, Д.С. Татаринов, С.Е. Анисимов. Tsarev E.M., Tatarinov D.S., Anisimov S.E. *Hand-Held Device for Forming Holes for Planting Containerized Seedlings*. Patent RF no. RU 2673743 A, 2018.

12. Руководство по лесовосстановлению и лесоразведению в лесостепной, степной, сухостепной и полупустынной зонах европейской части Российской Федерации. М.: Всерос. науч.-исслед. информ. центр по лесн. ресурсам, 1994. 152 с. *Guidelines for Reforestation and Afforestation in the Forest Steppe, Steppe, Dry Steppe and Semi-Desert Zones of the European Part of the Russian Federation*. Moscow, VNIITs Lesresurs Publ., 1994. 152 p.

13. Степень Р.А. Ориентировочная оценка содержания пихтового масла в древесной зелени // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35, № 1-2. С. 123–126. Stepen R.A. Indicative Content Rating Fir Oil from the Tree Green. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2017, vol. 35, no. 1-2, pp. 123–126.

14. Степень Р.А., Невзоров В.Н., Невзорова Т.В. Организация производства пихтового масла. Красноярск: КрасГАУ, 2010. 104 с. Stepen' R.A., Nevzorov V.N. *Organization of Fir Needle Oil Production*. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2010. 104 p.

15. Усольцев В.А., Воронов М.П., Колчин К.В., Маленко А.А., Кох Е.В. Трансконтинентальная аддитивная модель и таблица для оценки фитомассы елово-пихтовых древостоев Евразии // Вестн. АГАУ. 2017. № 9(155). С. 91–100. Usoltsev V.A., Voronov M.P.,

Kolchin K.V., Malenko A.A., Koch E.V. Transcontinental Additive Model and Weight Table for Estimating Biomass of Spruce-Fir Forests in Eurasia. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2017, no. 9(155), pp. 91–100.

16. Ухов О.Н., Буркова В.Н., Калинин Г.И., Терентьева Г.А. Исследование химического состава отходов переработки пихтовой лапки // Химия растит. сырья. 2006. № 1. С. 55–58. Ukhov O.N., Burkova V.N., Kalinkina G.I., Terent'yeva G.A. Study of the Chemical Composition of Wastes of Fir Bough Processing. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2006, no. 1, pp. 55–58.

17. Ушанов С.В., Степень Р.А., Ушанова В.М. Возрастная динамика содержания пихтового масла в древесной зелени *Abies sibirica*. Теоретические аспекты оценки // Химия растит. сырья. 2017. № 1. С. 129–136. Ushanov S.V., Stepen R.A., Ushanova V.M. Age-Specific Dynamics of the Oil Composition in the Woody Greenery of *Abies sibirica*. Theoretical Aspects of Evaluation. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2017, no. 1, pp. 129–136. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017011448>

18. Blight M.M., Donald I.R.C. Sample Reproducibility *Pinus* Essential Oil Analyses. *The New Zealand journal of science and technology*, 1964, vol. 7, no. 2, pp. 212–214.

19. Bourrell C., Perineau F., Michel G., Bessiere J.M. Catnip (*Nepeta cataria* L.) Essential Oils: Analysis of Chemical Constituents, Bacteriostatic and Fungistatic Properties. *Journal of Essential Oil Research*, 1993, vol. 5, iss. 2, pp. 159–167. DOI: <https://doi.org/10.1080/10412905.1993.9698195>

20. Brunke E.-J., Waite G. *Progress in Essential Oil Research: Proceedings of the International Symposium on Essential Oils*. Germany, De Gruyter, 1986, vol. 16. 668 p. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110855449>

21. Chialva F., Frattini C., Martelli A. Unusual Essential Oils with Aromatic Properties. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1985, vol. 181, iss. 1, pp. 32–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01124804>

22. Kalinkina G., Beresovskaja E., Dmitruk S. Essential Oils as Natural Complexes of Biologically Active Substances. *International Conference of Natural Products and Physiologically Active Substances (JCNPAS-98)*. Novosibirsk, 1998, p. 85.

23. Kolesnikova R., Tagiltsev Yu. The Essential Oils of the Far East Conifers. *Abstracts of the Scientific Program XI International Congress of Essential Oils*. New Delhi, 1989, pp. 63–69.

24. Weyerstahl P., Marschall-Weyerstahl H., Kaul V.K., Manteuffel E., Glasow L. Constituents of the Essential Oil of *Strobilanthes auriculatus*. *Liebigs Annalen der Chemie*, 1987, iss. 1, pp. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1002/jlac.198719870105>

25. Zafra M., Garcia-Pelagrim E. Seasonal Variations in the Composition of *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* Twigs and Needles Essential Oil. *The Journal of Agricultural Science*, 1976, vol. 86, iss. 1, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002185960006490X>

УДК 634.7

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-89-99

**ПОЛУЧЕНИЕ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА *Rubus arcticus* L.  
МЕТОДОМ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ****С.С. Макаров<sup>1</sup>**, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>**Г.В. Тяк<sup>1</sup>**, канд. биол. наук, рук. группы недревесной продукции леса;*ResearcherID*: [AAB-4215-2021](https://orcid.org/0000-0002-1081-4054), *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1081-4054>**И.Б. Кузнецова<sup>2</sup>**, 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. Чудецкий<sup>1</sup>**, вед. инж.; *ResearcherID*: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4804-7759>**С.Ю. Цареградская<sup>3</sup>**, канд. с.-х. наук, уч. секретарь; *ResearcherID*: [AAE-1073-2020](https://orcid.org/0000-0002-3426-6996),*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-3426-6996><sup>1</sup>Центрально-европейская лесная опытная станция, просп. Мира, д. 134, г. Кострома, Россия, 156013; e-mail: makarov\_serg44@mail.ru, ce-los-np@mail.ru, a.chudetsky@mail.ru<sup>2</sup>Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Учебный городок, Караваевская с/а, д. 34, пос. Караваево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; e-mail: sonnereiser@yandex.ru<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; e-mail: tsaregradskaya@vniilm.ru

---

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 12.02.20 / Принята к печати 23.04.20

---

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований различных способов размножения княженики арктической в условиях Костромской области. Промышленное выращивание лесных ягодных культур является возможным эффективным решением проблем низкой рентабельности использования недревесной продукции леса, сокращения ресурсов дикорастущих ягодников, снижения их продуктивности и качества, а также рекультивации выработанных торфяных месторождений. Для создания подобных плантаций целесообразно применение высокопродуктивного сортового посадочного материала. Особое внимание уделено размножению и получению оздоровленного посадочного материала с помощью культуры клеток и тканей растений. Приведены данные по стерилизации эксплантов при введении в культуру *in vitro*. Наибольшая эффективность стерилизации наблюдается при использовании экостерилизатора бесхлорного (приживаемость растений на питательной среде MS составила 90–93 %). Проанализировано влияние количества пассажей растений-регенерантов на коэффициент размножения сортов княженики арктической. Показаны оптимальные концентрации цитокининов на этапе «собственно микроразмножение». Максимальное количество корней княженики арктической отмечено при добавлении в питательную среду на этапе укоренения растений *in vitro* 1,0 мг/л индолил-3-масляной кислоты и 0,5 мг/л препарата «Экогель». Рассмотрены технологические и агротехнические операции, выполняемые при выращивании посадочного материала лесных ягодных культур. Приведены данные по коэффициентам вегетативного размножения растений, их устойчивости к болезням, урожайности, рекультивации выработанных торфяных месторождений. Лучшим посадочным материалом княженики арктической являются саженцы с закрытой корневой системой. При культивировании этой ягоды на торфянике использованы опилки и сфагнум. Экономическая эффективность ее выращивания с применением метода клонального микроразмножения составила 358,2 %.

---

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

**Для цитирования:** Макаров С.С., Тяк Г.В., Кузнецова И.Б., Чудецкий А.И., Цареградская С.Ю. Получение посадочного материала *Rubus arcticus* L. методом клонального микроразмножения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 89–99. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-89-99

**Ключевые слова:** княженика арктическая, клональное микроразмножение, *in vitro*, сорт, цитокинины, ауксины, выработанные торфяники, рекультивация, урожайность, экономическая эффективность.

## PRODUCING PLANTING MATERIAL OF *Rubus arcticus* L. BY CLONAL MICROPROPAGATION

**Sergey S. Makarov**<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

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

**Galina V. Tyak**<sup>1</sup>, Candidate of Biology, Head of the Non-Timber Forest Products Group;

ResearcherID: [AAB-4215-2021](https://orcid.org/0000-0002-1081-4054), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1081-4054>

**Irina B. Kuznetsova**<sup>2</sup>, 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. Chudetsky**<sup>1</sup>, Leading Engineer; ResearcherID: [H-1210-2019](https://orcid.org/0000-0003-4804-7759),

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

**Svetlana Yu. Tsaregradskaya**<sup>3</sup>, Candidate of Agriculture, Scientific Secretary;

ResearcherID: [AAE-1073-2020](https://orcid.org/0000-0002-3426-6996), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3426-6996>

<sup>1</sup>Central-European Forest Experimental Station, prosp. Mira, 134, Kostroma, 156013, Russian Federation; e-mail: makarov\_serg44@mail.ru, ce-los-np@mail.ru, a.chudetsky@mail.ru

<sup>2</sup>Kostroma State Agricultural Academy, Uchebnyy gorodok, Karavayevskaya s/a, 34, pos. Karavayevo, Kostroma District, Kostroma Region, 156530, Russian Federation; e-mail: sonnereiser@yandex.ru

<sup>3</sup>All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow Region, 141202, Russian Federation; e-mail: tsaregradskaya@vniilm.ru

**Original article** / Received on February 12, 2020 / Accepted on April 23, 2020

**Abstract.** The article presents the results of experimental studies on various propagation methods of the Arctic bramble in the Kostroma region. Industrial cultivation of forest berry plantations is a possible effective solution to the problem of low profitability of using non-timber forest products, reduction of the wild berries resources and their productivity and quality, and reclamation of cutover peatlands. It is advisable to use high-yield varietal planting material to create such plantations. Special attention is paid to propagation and production of healthy planting material using culture of plant cells and tissues. Data on sterilization of explants when introduced *in vitro* are given. The highest efficiency of sterilization was observed when using a chlorine-free eco-sterilizer (the plant survival rate on the MS nutrient medium was 90–93 %). The effect analysis of the passage number of regenerated plants on the multiplication factor of the Arctic bramble varieties was carried out. The optimal concentrations of cytokinins at the stage of micropropagation are shown. The largest number of the Arctic bramble roots was observed when adding 1.0 mg/L of Indole-3-butyric acid (IBA) and 0.5 mg/L of Ecogel to the nutrient medium. The technological and agrotechnical operations performed during the cultivation of planting material of forest berry plantations are considered. Data on the coefficients of vegetative propagation of plants and their resistance to diseases, yielding capacity, and recultivation of cutover peatlands are given. The best planting material of the Arctic bramble are ball-rooted seedlings. Sawdust and sphagnum were used in the cultivation of this berry on the peatland. The economic efficiency of its cultivation with the method of clonal micropropagation was 358.2 %.

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

**For citation:** Makarov S.S., Tyak G.V., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I., Tsaregradskaya S.Yu. Producing Planting Material of *Rubus arcticus* L. by Clonal Micropropagation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 89–99. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-89-99

**Keywords:** Arctic bramble, clonal micropropagation, *in vitro*, variety, cytokinins, auxins, cutover peatlands, reclamation, yielding capacity, economic efficiency.

### Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный рост антропогенной нагрузки на природную среду и не в меньшей степени на лесные массивы. Осушение болот, заготовка торфа, длительный неконтролируемый сбор ягод привели к сокращению ресурсов дикорастущих черники, голубики, брусники, княженики и клюквы, уменьшению продуктивности и ухудшению качества грибных угодий, лекарственных, медоносных, пищевых, технических и других полезных растений леса. Использование дикорастущих ягодников не позволяет стабильно работать предприятиям, специализирующимся на заготовке и переработке дикорастущих ягод, поскольку отмечаются значительные различия в их урожайности по годам, а в отдельные годы – ее отсутствие. Выращивание лесных ягодных культур в промышленных масштабах на специализированных плантациях является наиболее эффективным способом решения данной проблемы. Одной из актуальных задач лесного хозяйства становится повышение рентабельности использования недревесной продукции леса. Рекультивация выработанных торфяников путем создания на них плантаций лесных ягодных культур поможет повысить эффективность работы отрасли, способствуя при этом резкому снижению пожароопасности торфяников, прекращению их водной и воздушной эрозии [12, 20, 23].

Для создания производственных ягодных плантаций используется высококачественный сортовой посадочный материал. Как в России, так и за рубежом последние несколько десятилетий ведутся селекционные работы по созданию сортов лесных ягодных культур, обладающих высокой продуктивностью и экологической пластичностью. К настоящему времени имеется целый ряд отечественных сортов, вновь созданных и отобранных гибридных, являющихся перспективными для культивирования в условиях южнотаежного лесного района и района хвойно-широколиственных лесов европейской части России. Для плантационного выращивания на рекультивируемых торфяниках одна из наиболее перспективных культур – княженика арктическая, ягоды которой всегда пользовались особым вниманием из-за своих вкусовых и ароматических свойств.

За последние годы во многих странах, включая Россию, изменения в ведении сельского и лесного хозяйства повлекли за собой сокращение численности княженики. Финские и эстонские исследователи в качестве причины данного явления отметили в большинстве случаев осушение болот, благоприятной для обитания этой ягоды среды, а также зарастание неokaшиваемых лугов и лесных опушек высокими злаками, осоками и плотным подлеском, вытесняющими княженику [21].

О достоинствах княженики арктической и необходимости ее культивирования находятся упоминания в трудах садоводов России XIX в. С 1960-х гг.

шведские и финские исследователи начали активно изучать введение княженики в культуру, проводить селекционные работы по созданию сортов данного вида. В 1972 г. в Финляндии из местных форм этой ягоды выведены сорта Mespi и Mesma, путем скрещивания которых спустя десятилетие получен гибридный сорт Pima. Последующие долгосрочные исследования позволили из большого числа клонов княженики, отобранных в естественных условиях, выделить ряд перспективных форм, которые легли в основу новых сортов (Marika, Muuruska, Susanna, Elpee, Alli), превосходящих по урожайности сорта Pima и Mespi. В 1980-х гг. вследствие гибридизации дикорастущих особей княженики из Швеции (*Rubus arcticus* L. subsp. *Arcticus*) и Аляски (*Rubus arcticus* L. subsp. *stellatus* (Sm.) Boiv.) создано еще несколько сортов: в Финляндии – Astra, Aura; в Швеции – Anna, Beata, Sofia, Linda, Valentina. Данные сорта отличаются от других значительно большим размером и плотностью плодов, крепкими и высокими побегами, высоким коэффициентом вегетативного размножения, лучшей устойчивостью к болезням. При благоприятных условиях созданные сорта и гибридные формы достигали урожайности более 1500 г/м<sup>2</sup> [16–18, 21].

Ввиду своих пищевых и лекарственных свойств княженика арктическая находит все более широкое применение как в пищевой промышленности, так и в медицине. При этом на мировом рынке деликатесные ягоды княженики являются одними из наиболее дорогостоящих. Например, по результатам анализа цен на ягодную продукцию в Финляндии, стоимость 1 кг данных ягод составляет 20 евро. В связи с этим спрос на внутреннем рынке России на посадочный материал в последние годы возрастает как среди сельскохозяйственных предприятий и предпринимателей, так и среди исследователей различного профиля, а также садоводов-любителей.

Много лет на Центрально-европейской лесной опытной станции Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации (ЛОС ВНИИЛМ) осуществляли работы по интродукции новых видов лесных ягодных растений, перспективных при выращивании на выработанных торфяниках. С 2005 г. проводили исследования по культивированию княженики. В Костромской области на выработанном торфянике переходного типа испытывали гибридные сорта княженики Anna, Sofia, Astra и Beata. На опытных участках с мощностью торфа около 1 м и кислотностью (рН<sub>KCl</sub>) 3,9...4,0 все тестируемые сорта имели хорошие рост и плодоношение. При этом урожайность данных сортов и созданных на их основе гибридных форм может составлять 200–300 г/м<sup>2</sup>, а при благоприятных условиях – до 1500 г/м<sup>2</sup> [11, 13].

Княженику можно размножать как семенным способом, так и вегетативным (корневыми и стеблевыми черенками, делением куста) [13]. Однако наиболее современным и эффективным способом размножения сортового посадочного материала является клональное микроразмножение – метод, основанный на способности растений к регенерации и тотипотентности клеток, который позволяет в короткие сроки вне сезона получать огромное количество оздоровленного посадочного материала даже от инфицированных и трудноразмножаемых в обычных условиях видов растений. В качестве исходного экспланта при этом используют апикальную меристему, которая является физиологически наиболее здоровой частью растения [9].

Цель работы – оценить перспективность выращивания посадочного материала княженики арктической, полученного методом клонального микроразмножения, в условиях выработанных торфяников Костромской области.

*Объекты и методы исследования*

Исследования проводили в 2017–2019 гг. в Лаборатории клонального микроразмножения ЛОС ВНИИЛМ и на опытных участках в условиях выработанных торфяных месторождений в Костромском районе Костромской области. Объектами исследования служили растения княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) сортов Anna и Sofia.

Княженика арктическая (или арктическая малина, поленика, мамура) – многолетнее травянистое, вегетативно-подвижное растение из семейства розоцветные (*Rosales*) [4, 5, 14, 15, 22]. Данный бореально-гипоарктический вид обычно встречается небольшими группами или рассеянными экземплярами на увлажненных просеках, на гарях и вырубках, на заболоченных опушках леса, на пойменных лугах, в сфагновых сосняках, в осоково-сфагновых и осоково-разнотравных лесах, на болотах, в тундре и в редколесных местах лесотундры [14].

Растения княженики имеют длинные шнуровидные корни, которые ветвятся параллельно поверхности почвы на глубине 10–25 см и не имеют корневых волосков, их функцию выполняет микориза. Из почек, находящихся на корнях, формируются многочисленные вертикальные побеги. Надземная часть княженики – однолетняя, а подземные части (включая корневую систему, многочисленные подземные побеги и почки возобновления) – многолетние [13]. Надземные побеги могут иметь высоту до 30 см и состоят, как правило, из 5–9 междоузлий. Листья темно-зеленые, морщинистые, тройчатые, тонкие, на длинных, тонко опушенных черешках, с прилистниками. Цветение княженики наблюдается обычно в мае–июне, однако в посадках оно может происходить и в июле–августе. Основными опылителями являются шмели и пчелы. Начало созревания ягод бывает в 1-й декаде июля. Постепенность этого процесса обуславливает относительно длинный период их сбора. Он (основная часть – в 1-й половине июля) осуществляется 1–2 раза в неделю в зависимости от погодных условий [10]. Цветки княженики розово-алые, чаще обоеполые, диаметром 1–3 см, большей частью одиночные, расположенные на верхушке стебля. Княженика – самобесплодное растение, поэтому в естественных условиях в некоторых местах произрастания, несмотря на обильное цветение, плоды у нее отсутствуют. В связи с этим возникает необходимость переопыления растений разных сортов или клонов.

Плод княженики – сборная сочная костянка, со средней массой 1–2 г. В ягодах содержатся до 7 % сахаров (в основном глюкоза и фруктоза), пектиновые, дубильные и ароматические вещества (0,4–0,6 %), до 200 мг/100 г витамина С, а также органические кислоты. Особенно княженика богата эллагитанином, который препятствует размножению вредных кишечных бактерий. Также присутствуют антоцианы, обладающие антиоксидантным действием, чем обусловлен цвет плодов [2, 8].

Княженика имеет достаточную зимостойкость. Согласно данным многолетних исследований, повреждения данного растения под снежным покровом, даже при температуре воздуха в декабре ниже –30 °С и при слое снега 2 см, достаточно редки [13]. Однако весенние заморозки наносят вред молодым надземным побегам и цветкам княженики, что значительно влияет на урожай. По данным финских ученых, цветки княженики способны выдерживать снижение температуры до –2,6 °С, тогда как при температуре ниже –4 °С они чаще всего погибают.

Процесс клонального микроразмножения растений состоит из 4 основных этапов: введение в культуру *in vitro* (выбор растения-донора, стерилизация эксплантов, их изолирование и получение стерильной культуры); собственно микроразмножение (получение максимального количества меристематических клонов посредством микрочеренкования растений-регенерантов); укоренение размноженных микропобегов в условиях *in vitro*; адаптация укорененных растений к нестерильным условиям *in vivo* с последующим их выращиванием в тепличных условиях и подготовкой к реализации или посадке в условиях открытого грунта [9].

Введение в культуру является самым затратным этапом клонального микроразмножения вследствие больших потерь и довольно низкой производительности. Его успешному прохождению способствует учет сезонности физиологических процессов. Наиболее интенсивно регенерация меристематических эксплантов происходит обычно в фазу активного роста побегов. Введенные в культуру *in vitro* экспланты, а затем растения-регенеранты княженики размещали в световой комнате с люминисцентными лампами (освещенность 2500–4000 лк), поддержанием влажности 75–80% и температуры +22...+25 °С, при 16-часовом фотопериоде. В качестве стерилизующих агентов применяли раствор «Белизны» (в разведении с водой 1:3), сулему (0,1%), экостерилизатор бесхлорный [3, 6]. Определяли жизнеспособность эксплантов как отношение количества выживших к количеству высаженных.

На этапе собственно микроразмножения использовали питательную среду по прописи MS (Мурасиге–Скуга) [19] с добавлением агар-агара, сахарозы, физиологически активных веществ и цитокинина 6-БАП (6-бензил-аминопурил) в концентрациях 0,5 и 1,0 мл/л [1]. На этапе укоренения *in vitro* в питательную среду MS добавляли ауксин ИМК (индолил-3-масляная кислота) в концентрациях 0,5 и 1,0 мг/л, а также препарат «Экогель» – 0,5 мг/л. На этапе адаптации растений к нестерильным условиям *in vivo* применяли различные субстраты: торф верхового типа; смесь торфа с песком в соотношении 1:1; кокосовый субстрат.

Адаптированный оздоровленный посадочный материал был высажен на опытных участках в целях закладки плантации на выработанных торфяниках. Перед посадкой участок предварительно очистили от многолетних корневищных сорняков во избежание угнетения и полного вытеснения растений княженики. Посадку саженцев с закрытой корневой системой, выращенных методом культуры клеток и тканей, осуществляли в апреле–мае (наиболее оптимальный срок) и в августе–начале сентября. Растения помещали в почву вручную рядами с шагом посадки 25–40 см, расстоянием между рядами – 0,8–1,0 м. Для успешного перекрестного опыления на участке размещали 2–3 сорта княженики с чередованием растений разных сортов в ряду или рядов с разными сортами [11, 22].

Мульчирование (размер слоя – 3–5 см) проводили сразу после посадки для лучшего препятствия росту сорной растительности, снижения температуры почвы в летний период и оптимизации ее увлажнения, предотвращения засухи, перегрева или переохлаждения корнеобитаемого слоя, а также улучшения структуры почвы, что в результате поспособствовало улучшению роста и плодоношения княженики [10]. В качестве мульчи использовали торф, мох сфагнум, опилки и измельченную кору. Согласно результатам экспериментов,

проведенных ЛОС ВНИИЛМ, с применением опилок и сфагнома можно получать урожай на 40 % больше и не требуется повторного мульчирования вследствие смыкания растений в рядах на 2–3-й год выращивания.

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартного программного пакета Microsoft Office 2016.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В результате исследований выявлено, что на этапе введения в культуру *in vitro* наиболее эффективным стерилизующим агентом является экостерилизатор бесхлорный при времени стерилизации 10 мин: приживаемость растений княженики составила 90–92 % (табл. 1). В варианте с сулемой 0,1 % при времени стерилизации 5 мин процент приживаемости был ниже (80–82 %), еще ниже (лишь 65–70 %) – при использовании раствора моющего средства «Белизна» в разведении с водой 1:3 и времени стерилизации 10 мин.

Таблица 1

#### Влияние стерилизующих агентов и времени стерилизации на приживаемость эксплантов княженики арктической разных сортов

| Стерилизующий агент              | Время стерилизации, мин | Приживаемость эксплантов по сортам, % |       |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------|
|                                  |                         | Anna                                  | Sofia |
| Белизна в разведении с водой 1:3 | 5                       | 34                                    | 30    |
|                                  | 10                      | 65                                    | 70    |
|                                  | 15                      | 46                                    | 52    |
| Сулема 0,1 %                     | 5                       | 80                                    | 82    |
|                                  | 10                      | 66                                    | 60    |
|                                  | 15                      | 36                                    | 34    |
| Экостерилизатор бесхлорный       | 5                       | 72                                    | 68    |
|                                  | 10                      | 90                                    | 92    |
|                                  | 15                      | 50                                    | 48    |

На этапе микроразмножения наибольший суммарный прирост побегов наблюдали при добавлении в питательную среду MS цитокинина 6-БАП в концентрации 0,5 мг/л: количество микропобегов составило в среднем 2,9 шт. На этапе укоренения *in vitro* образование максимального количества корней княженики (4,4 шт.) отмечено при наличии в питательной среде ауксина ИМК в концентрации 1,0 мг/л с одновременным добавлением препарата «Экогель» в концентрации 0,5 мг/л.

На этапе адаптации княженики с хорошо развитой корневой системой к почвенным условиям выявлена наиболее высокая приживаемость растений на торфяном и кокосовом субстратах (89,9–90,1 %), тогда как на субстрате «торф + песок» 1:1 она была значительно меньше (49,7–50,4 %) (табл. 2). Не отмечено какой-либо четкой закономерности по биометрическим показателям (количество листьев, длина побегов).

Таблица 2

**Приживаемость и биометрические показатели княженики арктической на этапе адаптации к нестерильным условиям *in vivo* в зависимости от субстрата**

| Сорт  | Состав субстрата  | Приживаемость, % | Средняя длина побегов, см | Количество листьев, шт. |
|-------|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|
| Anna  | Торф верховой     | 90,0             | 5,4                       | 4,3                     |
|       | Торф + песок 1:1  | 50,4             | 5,8                       | 4,1                     |
|       | Кокосовая стружка | 90,1             | 5,6                       | 3,9                     |
| Sofia | Торф верховой     | 89,9             | 5,5                       | 2,5                     |
|       | Торф + песок 1:1  | 49,7             | 4,2                       | 4,0                     |
|       | Кокосовая стружка | 90,0             | 6,0                       | 5,7                     |

Экономическая составляющая процесса выращивания лесных ягодных культур является немаловажным условием для культивирования в производственных целях. Эффективность массового разведения посадочного материала наиболее полно отражает его рентабельность [7]. Выращивание княженики в культуре *in vitro* является энерго-, материально- и наукоемким. В затраты включаются стоимость исходного материала, химических реактивов, посуды, инструментов, электроэнергии, водоснабжения, амортизационные отчисления, заработная плата и пр.

В структуре производственных затрат (табл. 3) наименьшим удельным весом обладают расходы на этиловый спирт (0,06 %), дезинфицирующие вещества (0,04 %), медицинскую вату (0,03 %). Амортизационные отчисления и заработная плата составляют наибольшую часть затрат (25,14 и 57,49 % соответственно). Стоимость исходного растительного материала для клонального микроразмножения определяли следующим образом: цена одного контейнера с растениями составляла 65 р.; в контейнере – 20 микропобегов; в нашем случае для размножения необходимо 500 шт. Стоимость субстрата вычисляли исходя из цены кокосовой стружки. По итогам расчетов затраты на исходный растительный материал составили 1 625 р. [6].

Таблица 3

**Структура производственных затрат при клональном микроразмножении княженики арктической**

| Статья затрат                   | Производственные затраты |       |
|---------------------------------|--------------------------|-------|
|                                 | р.                       | %     |
| Исходные растения               | 1 625                    | 0,26  |
| Питательная среда               | 3 250                    | 0,53  |
| Субстрат                        | 3 600                    | 0,59  |
| Этиловый спирт                  | 400                      | 0,06  |
| Медицинская вата                | 200                      | 0,03  |
| Пленка                          | 720                      | 0,12  |
| Дезинфицирующие вещества        | 240                      | 0,04  |
| Электроэнергия                  | 15 794                   | 2,58  |
| Водоснабжение                   | 4 700                    | 0,77  |
| Отопление                       | 12 000                   | 1,96  |
| Транспорт                       | 430                      | 0,07  |
| Заработная плата с начислениями | 352 189                  | 57,50 |
| Амортизационные отчисления      | 154 000                  | 25,14 |
| Накладные расходы               | 63 414                   | 10,35 |
| <i>Всего</i>                    | 612 565                  | 100   |

Затраты на саженцы обладают наибольшим удельным весом в структуре производственных затрат (табл. 4).

Таблица 4

**Себестоимость выращивания саженцев княженики  
арктической в условиях производства**

| Показатель                   | Значение   |
|------------------------------|------------|
| Себестоимость 1 растения, р. | 40,42      |
| Выход растений, шт.          | 20 800,00  |
| Производственные затраты, р. | 840 807,78 |

Экономическая эффективность получения княженики методом клонального микроразмножения характеризуется рядом показателей (табл. 5). Цена реализации при этом определялась в процессе анализа рыночных цен на посадочный материал княженики арктической в Костромской области.

Таблица 5

**Экономическая эффективность выращивания княженики  
арктической**

| Показатель  | Значение |
|---|----------|
| Полная себестоимость 1 растения, р.                     | 43,6     |
| Цена реализации 1 растения, р.                          | 200,0    |
| Прибыль (+) или убыток (-) от реализации 1 растения, р. | 156,3    |
| Рентабельность, %                                       | 358,2    |

Рентабельность производства по промышленному культивированию княженики арктической в условиях выработанных торфяных месторождений – 358,2 % [6], т. е. прибыль составит 3 р. 58 к. на каждый рубль возмещенных затрат.

*Заключение*

Таким образом, создание лесных ягодных плантаций, в частности княженики арктической, в условиях выработанных торфяников позволит выращивать редкие виды ягодных культур с более высокой урожайностью, а также повысить биоразнообразие региона.

На этапе введения эксплантов княженики арктической в культуру *in vitro* для обеспечения наиболее высокой приживаемости растений целесообразно использовать экостерилизатор бесхлорный при времени стерилизации 10 мин. Для получения наибольшего числа микропобегов на этапе микроразмножения рекомендуется добавление в питательную среду Мурасиге–Скуга цитокинина 6-бензиламинопурила в концентрации 0,5 мг/л. Для лучшей стимуляции корнеобразования на этапе укоренения растений в культуре *in vitro* необходимо наличие в питательной среде ауксина индоллил-3-масляной кислоты в концентрации 1,0 мг/л с одновременным добавлением препарата «Экогель» в концентрации 0,5 мг/л. Для получения максимальной приживаемости растений княженики арктической при их адаптации к нестерильным условиям рекомендуется использовать кокосовый субстрат, а также верховой торф.

Расчеты показали, что поэтапное выращивание княженики арктической методом клонального микроразмножения с последующим доращиванием растений в кассетах и дальнейшим выращиванием в полевых условиях позволит наладить экономически выгодное производство. Высокая рентабельность (более 300 %) реализации готовых саженцев свидетельствует о возможности обеспечения производственного предприятия высококачественным посадочным материалом в короткие сроки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агафонов Н.В., Фаустов В.В. Применение регуляторов роста в плодоводстве. М.: ВНИИТЭИСХ, 1972. 64 с. Agafonov N.V., Faustov V.V. *Using Growth Regulators in Fruit Farming*. Moscow, VNIITEISKh Publ., 1972. 64 p.
2. Баранова И.И., Смирнова Л.М., Ершова Г.Ф. Биологически активные вещества некоторых дикорастущих ягод Южной Карелии // Эколого-биологические особенности и продуктивность растений болот. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1982. С. 134–140. Baranova I.I., Smirnova L.M., Ershova G.F. Biologically Active Substances of Some Wild Berries of South Karelia. *Ecological and Biological Features and Productivity of Bog Plants*. Petrozavodsk, Karel'skiy filial AN SSSR Publ., 1982, pp. 134–140.
3. Биотехнология: в 8 кн. Кн. 3: Клеточная инженерия / сост. Р.Г. Бутенко, М.В. Гусев, А.Ф. Киркин и др.; под ред. Н.С. Егорова, В.Д. Самуилова. М.: Высш. школа, 1987. 127 с. *Biotechnology*: In 8 Books. Book 3: Cellular Engineering. Content by R.G. Butenko, M.V. Gusev, A.F. Kirkin et al. Ed. by N.S. Egorov, V.D. Samuilov. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 127 p.
4. Гельцер Г.В. Поленика (*Rubus arcticus* L.) как полезное и красивое растение // Вестн. Рос. общ-ва садоводства. 1860. № 6. С. 50–53. Gel'tser G.V. The Arctic Bramble (*Rubus arcticus* L.) as a Useful and Beautiful Plant. *Vestnik Rossiyskogo obshchestva sadovodstva*, 1860, no. 6, pp. 50–53.
5. Гудовских Ю.В., Егошина Т.Л., Кислицына А.В., Лугинина Е.А. Интродукция княженики арктической в условиях Волго-Вятского региона // Изв. СамНЦ РАН. 2017. Т. 19, № 2(2). С. 248–251. Gudovskikh Yu.V., Egoshina T.L., Kislitsyna A.V., Luginina E.A. Introduction of the Arctic Bramble in the Volga-Vyatka Region. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, vol. 19, no. 2(2), pp. 248–251.
6. Макаров С.С. Разработка технологии клонального микроразмножения лесных ягодных растений и введение их в культуру на выработанных торфяниках: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Пушкино, 2019. 25 с. Makarov S.S. *Development of Technology for Clonal Micropropagation of Forest Berry Plants and Their Introduction on Developed Peatlands*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Pushkino, 2019. 25 p.
7. Методические рекомендации по определению экономической эффективности научных достижений в садоводстве / сост. А.С. Косякин и др. М.: Всерос. селекц.-технол. ин-т садоводства и питомниководства, 2005. 111 с. *Guidelines for Determining the Economic Efficiency of Scientific Achievements in Gardening*. Content by A.S. Kosyakin et al. Moscow, VSTISP Publ., 2005. 111 p.
8. Недревесные лесные ресурсы Костромской области: дикорастущие плоды и ягоды, лекарственные растения и грибы: моногр. / А.Ф. Черкасов и др. Кострома: КГТУ, 2006. 250 с. Cherkasov A.F. et al. *Non-Timber Forest Resources of the Kostroma Region: Wild Fruits and Berries, Medicinal Plants and Mushrooms*: Monograph. Kostroma, KSTU Publ., 2006, 250 p.
9. Сельскохозяйственная биотехнология и биоинженерия / В.С. Шевелуха и др.; под ред. В.С. Шевелухи. М.: URSS, 2015. 700 с. Shevelukha V.S. et al. *Agricultural Biotechnology and Bioengineering*. Ed. by V.S. Shevelukha. Moscow, URSS Publ., 2015. 700 p.

10. Тяк Г.В. Выращиваем княженику // Питомник и частный сад. 2016. № 1. С. 18–22. Tyak G.V. Growing the Arctic Bramble. *Pitomnik i chastnyy sad*, 2016, no. 1, pp. 18–22.
11. Тяк Г.В., Алтухова С.А. Выращивание княженики арктической на выработанном торфянике // Интродукция нетрадиционных и редких растений: материалы IX Междунар. науч.-методич. конф. Мичуринск-научоград РФ: МичГАУ, 2010. Т. 1. С. 328–332. Tyak G.V., Altukhova S.A. The Cultivation of the Arctic Bramble on the Developed Peatland. *Introduction of Unconventional and Rare Plants: Proceedings of the IX International Scientific and Methodical Conference*. Michurinsk, MSAU Publ., 2010, vol. 1, pp. 328–332.
12. Тяк Г.В., Курлович Л.Е., Тяк А.В. Биологическая рекультивация выработанных торфяников путем создания посадок лесных ягодных растений // Вестн. КГАУ. 2016. Т. 11, № 2(40). С. 43–46. Tyak G.V., Kurlovich L.E., Tyak A.V. Biological Recultivation of Degraded Peatlands by Creating Forest Berry Plants. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of the Kazan State Agrarian University], 2016, vol. 11, no. 2(40), pp. 43–46. DOI: <https://doi.org/10.12737/20633>
13. 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. DOI: <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2018-52-95-99>
14. Фрейдлинг М.В. Поленика (*Rubus arcticus* L.) // Изв. Кар.-Фин. фил. АН СССР. 1949. № 3. С. 49–57. Freudling M.V. The Arctic Bramble (*Rubus arcticus* L.). *Izvestiya Karelo-Finskogo filiala AN SSSR*, 1949, no. 3, pp. 49–57.
15. Чернова Е.П. Поляника (*Rubus arcticus* L.) и ее введение в культуру. М.; Л.: АН СССР, 1959. 35 с. Chernova E.P. *The Arctic Bramble (Rubus arcticus L.) and Its Introduction*. Moscow, AN SSSR Publ., 1959. 35 p.
16. Hiirsalmi H., Junnila S., Säkö J. “Aura” and “Astra”, Finnish Arctic Bramble Hybrid Varieties. *Annales Agriculturae Fenniae*, 1987, vol. 26, pp. 261–269.
17. Kokko H., Hämäläinen J., Kärenlampi S. Cultivation of Arctic Bramble in Finland is Seriously Disturbed by Downy Mildew. *Forestry Studies XXX International Conference. Wild Berry Culture: An Exchange of Western and Eastern Experiences*. Tartu, 1998, pp. 82–86.
18. Kostamo R., Toljamo A., Antonius K., Kärenlampi S.O. Morphological and Molecular Identification to Secure Cultivar Maintenance and Management of Self-Sterile *Rubus arcticus*. *Annals of Botany*, 2013, vol. 111, iss. 4, pp. 713–721. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mct029>
19. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*, 1962, vol. 15, iss. 3, pp. 473–497. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
20. Noormets M., Karp K., Paal T. Recultivation of Opencast Peat Pits with *Vaccinium* Culture in Estonia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2003, vol. 64, pp. 1005–1014. DOI: <https://doi.org/10.2495/ECO030242>
21. 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(4), pp. 455–468. DOI: <https://doi.org/10.23986/afsci.5608>
22. Ragnar M., Rytönen P., Hedh J. *Åkerbär*. Luleå, Sweden, Black Island Books, 2017. 169 p.
23. 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.

УДК 581.543

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-100-109

**РОСТ И ПРОДУКТИВНОСТЬ ИНОРАЙОННЫХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ  
В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО УРАЛА***Л.А. Семкина, д-р биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-4433-2020](https://orcid.org/0000-0003-2351-3258),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2351-3258>**Е.А. Тишкина, канд. с.-х. наук, науч. сотр., доц.; ResearcherID: [AAC-4442-2020](https://orcid.org/0000-0001-6315-2878),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6315-2878>*

Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620014;

e-mail: Elena.MLOB1@yandex.ru, lidia.semkina@botgard.uran.ru

---

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 05.03.20 / Принята к печати 11.06.20

---

**Аннотация.** На протяжении последних десятилетий температура воздуха на Земле повышается. В г. Екатеринбурге этот процесс начался с 1930-х гг. XX столетия. В 1940–1949 гг. температура резко понизилась, затем резко повысилась и вновь упала, особенно в 1967–1968 гг., когда погибли многие крупные интродуценты, считавшиеся адаптированными: *Phellodendron amurense* Rupr., *Pseudotsuga taxifolia* (Lindl.) Britt. В связи с цикличностью погодных условий необходимо было оценить особенности приспособления и состояния интродуцированных растений за последние годы. Неблагоприятными для многих видов, особенно для хвойных, являются бесснежные осенне-зимние месяцы и ранние весенние плюсовые температуры. Так произошло в 2014 г., когда 16 октября выпал обильный снег и сохранялся более двух недель, затем начались оттепели, снег стаял, далее наступили отрицательные температуры, растения не успели подготовиться к зиме. В марте 2015 г. воздух прогрелся до +10 °С, в то время как температура почвы долго сохранялась отрицательной и в результате физиологической сухости погибло 100 % особей пестролистных форм туи западной *Thuja occidentalis* L. 'Ellwangeriana Aurea', 'Ericoides'. У других форм крона отмерла до уровня снегового покрова, но при обильном естественном поливе восстановилась: 'Aureaspicata', 'Gold Pearl', 'Golden Globe', 'Lutescens', 'Semperaurea', 'Wareana Lutescens'. В связи с неуклонным ростом суммы положительных температур и достижением определенного возраста, многие виды хвойных вступили в фазу плодоношения и дали самосев: *Pinus peuce* Grieseb., *P. strobus* L., *Picea canadensis* (Mill.) Britt. et al., *P. pungens* Engelm., *Pseudotsuga taxifolia* (Lindl.) Britt., *Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast. В самый теплый 2016 г. последняя дала обильный урожай – красно-коричневые с выступающими семенными чешуями шишки – сильный ветер сбросил их все. Они пролежали зиму под снегом и не рассыпались (вероятно, плоды были недозревшими), вследствие этого *Abies sachalinensis* была принята за кетелерию (*Keteleeria fortunei* (A. Murray bis) Carrière), у которой шишки не распадаются. Небывалое цветение отмечено у *Crataegus oxyacantha* L. 'Rosea Plena', *Mespilus germanica* L., *Syringa reflexa* С.К. Schneid, *Hamamelis virginiana* L. С повышением среднегодовых температур увеличилось число лет с аномальными погодными условиями и ухудшилось состояние некоторых растений.

**Для цитирования:** Семкина Л.А., Тишкина Е.А. Рост и продуктивность инорайонных древесных видов в условиях Среднего Урала // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 100–109. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-100-109

**Ключевые слова:** потепление климата, цветение, плодоношение, *Cupressaceae*, *Hydrangeaceae*, *Oleaceae*, *Pinaceae*, *Rosaceae*.

## GROWTH AND PRODUCTIVITY OF NON-INDIGENOUS WOODY SPECIES IN THE MIDDLE URALS

*Lidia A. Semkina*, Doctor of Biology, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-4433-2020](https://orcid.org/0000-0003-2351-3258), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2351-3258>

*Elena A. Tishkina*, Candidate of Agriculture, Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAC-4442-2020](https://orcid.org/0000-0001-6315-2878), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6315-2878>

Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; e-mail: [Elena.MLOB1@yandex.ru](mailto:Elena.MLOB1@yandex.ru), [lidia.semkina@botgard.uran.ru](mailto:lidia.semkina@botgard.uran.ru)

---

Original article / Received on March 5, 2020 / Accepted on June 11, 2020

---

**Abstract.** Climate warming has been recorded over the last decades. The air temperature in Yekaterinburg has been rising since the 1930s. Temperatures dropped sharply in 1940–1949, then rose sharply and fell again, especially in 1967–1968, when many large introduced species considered to be adapted died: *Phellodendron amurense* Rupr. and *Pseudotsuga taxifolia* (Lindl.) Britt. Due to the cyclical nature of weather conditions, it was necessary to assess the features of adaptation and state of the introduced plants in recent years. Snowless autumn and winter, temperatures above zero in early spring are unfavourable for many species, especially for conifers. Thus, in 2014 much snow fell on October 16 and melted in 2 weeks, temperatures below zero did not afford plants to prepare for the winter; in March 2015 the temperature rose up to +10 °C while the ground temperature was below zero for a long time. As a result of physiological dryness 100 % of specimens of variegated forms of northern white cedar *Thuja occidentalis* L. 'Ellwangeriana Aurea', 'Ericoides' died. In other forms the leafage died to the snow cover level and recovered after abundant rains: 'Aurea spicata', 'Gold Pearl', 'Golden Globe', 'Lutescens', 'Semperaurea' and 'Wareana Lutescens'. Due to a steady increase in the sum of positive temperatures and reaching a certain age, many conifer species entered the fruiting stage and gave self-seeding: *Pinus peuce* Grieseb, *Pinus strobus* L., *Picea canadensis* (Mill.) Britt. et al., *Picea pungens* Engelm., *Pseudotsuga taxifolia* (Lindl.) Britt., and *Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast. In the warmest year of 2016, the latter gave an abundant yield – red-brown cones with protruding seed scales; a strong wind dropped them all. They remained under the snow for the winter and did not crumble (probably, the fruits were unripe), so *Abies sachalinensis* was mistaken for *Keteleeria fortunei* (A. Murray bis) Carrière), which has cones that do not crumble. Unusual flowering was observed in *Crataegus oxyacantha* L. 'Rosea Plena', *Mespilus germanica* L., *Syringa reflexa* C.K.Schneid, *Hamamelis virginiana* L. With the rise in average annual temperatures, the number of years with abnormal weather conditions increased and the condition of some plants deteriorated.

**For citation:** Semkina L.A., Tishkina E.A. Growth and Productivity of Non-Indigenous Woody Species in the Middle Urals. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 100–109. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-100-109

**Keywords:** climate warming, bluming, fruting, *Cupressaceae*, *Hydrangeaceae*, *Oleaceae*, *Pinaceae*, *Rosaceae*.

### Введение

Считается доказанным, что повсеместное потепление климата началось с 30-х гг. XX столетия [21], но с неизменной цикличностью, обусловленной цикличностью активности солнца. В настоящее время эта проблема является

актуальной [7, 11, 19]. Проанализировав метеоданные за два 35-летия с интервалом 100 лет, В.Е. Фадеева, Г.А. Фирсов и Н.Е. Бульгин [7] установили, что фенологическое лето стало наступать на 11 дней раньше, а фенологическая зима на 8 дней позже. Сумма температур в теплую часть года возросла на 15 % (с 2222 °С до 2558 °С), это равнозначно перемещению Санкт-Петербурга на 400 км к югу по широте [7–10]. Более раннее наступление сезонных процессов отмечают многие исследователи [2, 3, 14–17, 20]. Изменяется граница лесных насаждений, которые сокращают площадь тундры [4–6, 11–13] и поднимаются в горные массивы, вытесняя альпийские растения [1, 18].

Цель работы – оценить особенности приспособления интродуцированных растений при резких сменах погодных условий.

#### Объекты и методы исследования

Визуальные фенологические наблюдения проведены по общепринятой методике [3]. Исследованы коллекционные растения семейств *Cupressaceae* Bartl., *Hydrangeaceae* Dumort., *Oleaceae* Hoff. et Link., *Pinaceae* Lindl., *Rosaceae* Juss. Всего изучено 260 видов и сортов, при этом при аномальных погодных условиях отмечали нетипичные особенности у древесных растений. Климатические данные взяты за период 1900–2018 гг. из базы данных международного обмена NOAA, США ([https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Екатеринбурге](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Екатеринбурге)). Статистическая обработка информации и построение графиков выполнены с помощью программного пакета MS Excel 2010.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В г. Екатеринбурге изменение температуры характеризовалось повышением в десятилетие 1920–1929 гг., понижением в 1940–1949 гг., затем резким повышением, а потом вновь снижением среднегодовой температуры, особенно в 1967–1968 гг., когда погибли рядовые посадки 15-летних растений бархата амурского *Phellodendron amurense* Rupr. и (до снегового покрова) пихта Дугласа (*Pseudotsuga taxifolia* (Lindl.) Britt.). С 1970 г. последовало постепенное потепление. Самые высокие температуры отмечены в десятилетие с 2000 гг. (рис. 1). Колебание осадков незначительное, но заметное увеличение их количества наблюдается в два десятилетия – с 1990 и 2000 гг. (рис. 2).

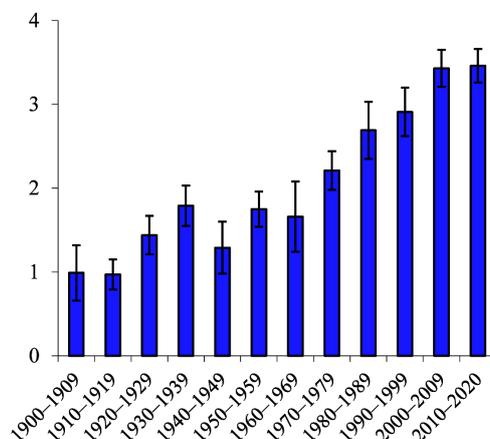
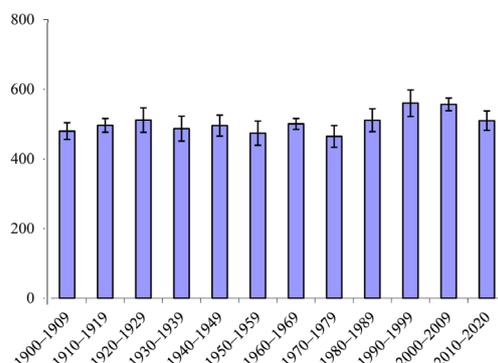


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха, °С, в г. Екатеринбурге за 10 лет с 1900 г.

Fig. 1. Average annual air temperatures for 10 years since 1900 in Yekaterinburg

Рис. 2. Среднегодовая сумма осадков, мм, в г. Екатеринбурге за 10 лет с 1900 г.

Fig. 2. Average annual precipitation for 10 years in Yekaterinburg since 1900



Состояние растений зависит не только от суммы положительных температур, но и от констелляции факторов внешней среды. Так, например, в 2010 г. несмотря на высокие показатели суммы положительных температур (см. таблицу) у многих видов растений не завязалось полноценных семян: *Syringa vulgaris*, *Weigela praecox*, значительное число видов барбариса и рябины – вследствие длительного отсутствия снегового покрова и сильных ветров вплоть до 1-й декады января. Отмечены ожоговые повреждения у туи западной *Thuja occidentalis* 'Columna' и ее пестролистных форм. Подобные данные получены и в Санкт-Петербурге. В одну из схожих по условиям зим снизилась зимостойкость у *Microbiota decussata* Kom. и *Juniperus davurica* Pall., хотя они считаются вполне зимостойкими [10].

#### Метеорологические показатели в г. Екатеринбурге

| Год  | Среднегодовая температура воздуха, °С | Сумма осадков, мм | Сумма положительных температур, °С |
|------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 2001 | +2,5                                  | 624               | 2436                               |
| 2002 | +2,8                                  | 584               | 3354                               |
| 2003 | +4,0                                  | 489               | 3462                               |
| 2004 | +3,5                                  | 604               | 2617                               |
| 2005 | +4,0                                  | 457               | 2732                               |
| 2006 | +2,5                                  | 626               | 2536                               |
| 2007 | +3,8                                  | 575               | 2676                               |
| 2008 | +4,6                                  | 537               | 2732                               |
| 2009 | +3,2                                  | 552               | 2590                               |
| 2010 | +3,3                                  | 438               | 2696                               |
| 2011 | +2,9                                  | 424               | 2688                               |
| 2012 | +4,0                                  | 447               | 3226                               |
| 2013 | +2,7                                  | 490               | 2732                               |
| 2014 | +2,4                                  | 619               | 2367                               |
| 2015 | +3,6                                  | 644               | 2442                               |
| 2016 | +3,7                                  | 416               | 2920                               |
| 2017 | +3,5                                  | 506               | 2459                               |
| 2018 | +2,6                                  | 475               | 2472                               |
| 2019 | +3,9                                  | 582               | 2588                               |
| 2020 | +5,3                                  | 493               | 2869                               |

В результате неуклонного повышения суммы положительных температур до 2010 г. произошел всплеск наивысшего цветения и плодоношения у видов *Phyladelphus*, *Hydrangea bretschneiderii*, сортовых сиреней и сортов *Syringa villosa* 'Preston', а также при почти ежегодном подмерзании обильно цвела сирень пониклая *Syringa reflexa* С.К. Schneid (рис. 3). Аномальность уральской погоды проявилась на следующий год. Осень 2011 г. была сухой и бесснежной, снег выпал только в конце декабря, но морозы достигали  $-20$  °С.



Рис. 3. *Syringa reflexa* С.К. Schneid

Fig. 3. *Syringa reflexa* С.К. Schneid

Весна оказалась затяжная, холодная погода стояла весь март до середины следующего месяца, но в 3-й декаде апреля температура резко поднялась до  $+20$  °С и даже до  $+30$  °С днем. Большинство видов откликнулось на эти условия, и произошел сдвиг всех фенологических фаз на две недели. Обильное цветение отмечено у многих раноцветущих растений – жимолостных и розоцветных. Этот год оказался критическим для многих интродуцированных видов семейств *Pinaceae*, *Taxaceae*, *Cupressaceae*. Погибли почти все особи 2–3 лет и даже 12-летние экземпляры *Picea canadensis* 'Conica', пострадали саженцы *Taxus baccata* L., кипарисовики, очень много отмерших побегов было у *Juniperus sibirica* 'Tamariscifolia', пострадали даже молодые побеги *Picea pungens* Engelm.

Наивысший пик положительных температур достигнут в 2012 г. – 3226 °С со среднегодовой температурой  $+4$  °С, но и предыдущие (2002–2003) теплые годы дали толчок небывалому плодоношению всех видов хвойных. Обильный самосев отмечен у *Pinus peuce* Griseb., *P. strobus* L., *Picea canadensis* (Mill.) Britt., *P. pungens* Engelm. После теплых лет *Pseudotsuga taxifolia* (Lindl.) Britt., которая погибла до уровня снегового покрова в 1968 г., восстановилась и начала обильно плодоносить и давать самосев. Наличие самосева является показателем адаптированности видов к новым условиям.

Обильное плодоношение отмечено у следующих видов хвойных: *Picea abies* (L.) Karst, *P. canadensis* (Mill.) Britt. et al., *P. engelmannii* Parry ex Engelm., *P. jezoensis* (Siebold et Zucc.) Carr., *P. mariana* Mill. B.S.P., *P. omorica* (Pancic) Purk., *P. pungens* Engelm., *P. rubens* Sarg. В связи с достижением возраста плодоношения и благоприятными условиями года впервые появились шишки у *Abies holophylla* Maxim., *A. sachalinensis* (F.Schmidt) Mast., *Pseudotsuga taxifolia* (Lindl.) Britt., *Tsuga canadensis* (L.) Carr., *Taxus baccata* L. 'Depressa Aurea'.

В 2013 г. плюсовые температуры наступили с 16 апреля, сумма положительных температур составила в этом месяце 157 °С, в следующем – 361 °С, заморозков не было, в результате чего образовались полноценные семена клена серебристого *Acer sacharinum* L.

В 2014 г. 16 октября внезапно выпал обильный снег и сохранялся более двух недель, затем были оттепели, снег стаял, далее отрицательные температуры сковали землю, не покрытую снегом, – растения не успели подготовиться к зиме. Еще более сильный удар был нанесен в марте 2015 г. (с 18 по 22 число держались плюсовые температуры). Днем ярко светило солнце, нагревая надземную часть кроны, температура воздуха доходила до +10 °С, в то время как температура почвы долго сохранялась отрицательной, вследствие этого у многих видов растений наступила физиологическая сухость. Туя западная и ее пирамидальные формы в защищенных условиях не пострадали. Гибель 100 % особей установлена у таких пестролистных форм, как *Thuja occidentalis* 'Elwangeriana Aurea', 'Ericoides'. У других форм крона погибла до уровня снегового покрова ('Aureaspicata', 'Gold Pearl', 'Golden Globe', 'Lutescens', 'Semperaurea', 'Wareana Lutescens'), но дождливое лето 2015 г. (644 мм осадков) способствовало ее восстановлению.

Кроме того, у многих видов увеличился однолетний прирост. Так, в 2014 г. у вейгелы Миддендорфа он составлял 55 см, а в 2015 г. – 150 см. Цветение из-за подмерзания верхних побегов (до 40 %) было только на нижних ярусах. Семена не вызрели по причине дождливого прохладного лета. Также мало семян созрело у вейгелы ранней, у которой побеги были повреждены на 30 %. Оба вида не успели подготовиться к зиме и ушли в покой в 2014 г. с неопавшими листьями.

Зима 2015–2016 гг. была относительно мягкой, что способствовало сохранению цветковых почек у большинства видов и форм. Лето оказалось очень жарким и сухим, температура днем доходила до +30 °С и выше (с середины мая по август). Благодаря этому многие виды обильно цвели. Особенно следует отметить пышное цветение махрового боярышника *Crataegus oxyacantha* 'Rosea Plena' (рис. 4), раньше оно не наблюдалось. Также обильно цвела мушмула *Mespilus germanica* L.



Рис. 4. *Crataegus oxyacantha* 'Rosea Plena'

Fig. 4. *Crataegus oxyacantha* 'Rosea Plena'

Осадков в мае–августе выпало в 4 раза меньше по сравнению с предыдущим годом. Из-за сухости многие виды уже в августе сбрасывали листья, особенно тополя, ивы. Формы туи западной без полива сбросили пожелтевшую коричневатую хвою. Однако с выпадением осадков в сентябре начались вторичный прирост побегов и вторичное цветение – у сиреней, яблонь, боярышников, вейгел.

Уникальной оказалась и осень 2016 г. В результате продолжительного вегетационного периода многие виды растений не успели подготовиться к зиме и сбросить листву. Сумма положительных температур в этом году составила 2920 °С, в 2015 – 2442 °С, в 2014 – 2367 °С. Плюсовые температуры держались до 15 октября.

В результате ряда теплых лет очень обильно начала плодоносить *Abies sachalinensis* (F.Schmidt) Mast. В 2016 г. в конце сентября вся территория вокруг пихты была усеяна темно-коричневыми с красноватым оттенком недозревшими шишками, с несколько выступающими семенными чешуями (рис. 5). На рисунке справа видны нераспавшиеся прошлогодние недозревшие шишки. Дерево находится в особых микроклиматических условиях: с двух сторон огорожено крупными растениями, лиственницей и орехом маньчжурским, и с двух сторон постройками; участок плодородный и расположен недалеко от водоема.



Рис. 5. *Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast.

Fig. 5 *Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast.

В 2017 г. в условиях затяжной прохладной весны произошла задержка фенофаз многих интродуцированных видов, а заморозки в конце мая–начале июня нарушили переопыление и образование плодов. В результате этого отмечены слабое плодоношение у многих видов боярышника, яблони и полное отсутствие плодоношения у рябины, аронии, вишни, а также у вейгелы ранней. У сорокалетней туи западной колонновидной формы погибла скелетная ветвь. В 2020 г. за счет довольно обильных осадков (582 мм) в предыдущем году дерево восстановилось от новых побегов.

Осенние заморозки в первых числах октября нарушили естественный ход вегетации: листья большинства видов свернулись и почернели, отсутствовало осеннее окрашивание из-за необразовавшихся антоцианов и флавонолов.

В конце октября и начале ноября с возвратом положительных температур обильно расцвел *Hamamelis virginiana* L. (рис. 6), являющийся редким растением для культивирования на Урале и в Сибири. В результате благоприятных теплых лет данное растение превратилось в крупный кустарник до 2,5 м высотой.



Рис. 6. *Hamamelis virginiana* L.

Fig. 6. *Hamamelis virginiana* L.

В 2019 г. полностью отсутствовало плодоношение у хвойных. В 2020 г. среднегодовая температура воздуха составила + 5,3 °С, сумма положительных температур – 2869 °С, вследствие этого все виды сосен образовали макроспорангии, и в 2021 г. ожидается обильное плодоношение у всех видов хвойных.

#### Выводы

1. В связи с потеплением климата многие интродуцированные растения, ранее считавшиеся малоустойчивыми, вступили в фазы цветения и плодоношения.

2. У большого числа интродуцированных видов хвойных при обильном плодоношении появился самосев как показатель адаптированности видов к новым условиям.

3. Одновременно с повышением среднегодовых температур увеличилось число лет с аномальными погодными условиями, ухудшающими состояние растений, особенно при наличии заморозков в конце мая–начале июня (2017 г.).

4. Критическими условиями для саженцев хвойных являются сухие и бесснежные осень и начало зимы (2010–2011 гг.), а для взрослых хвойных – наступление физиологической сухости (весна 2015 г.).

5. В результате необычно высоких температур весной у растений происходит сдвиг всех фенологических фаз (2012, 2021 гг.).

6. С ростом суммы положительных температур в условиях Урала и вследствие обильного плодоношения хвойных и лиственных растений увеличивается ассортимент, предлагаемый для озеленения городских территорий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьев А.А., Ерохина О.В., Соковнина С.Ю., Шалаумова Ю.В., Балакин Д.С. Продвижение древесно-кустарниковой растительности в горы и изменение состава тундровых сообществ (хр. Зигальга, Южный Урал) // Журн. СФУ. Биология. 2018. Т. 11, № 3. С. 218–236. Grigor'ev A.A., Erokhina O.V., Sokovnina S.U., Shalaumova Yu.V., Balakin D.S. The Advance of Woody and Shrub Vegetation to the Mountains and Changes in the Composition of Tundra Communities (Poperechnaya Mountain, the Zigalga Mountain Range in the Southern Urals). *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya* [Journal of Siberian Federal University. Biology], 2018, vol. 11, no. 3, pp. 218–236. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0067>

2. Жмылев П.Ю., Жмылева А.П., Карпукхина Е.А., Титовец А.В. Возможные причины изменения сезонного развития растений в связи с потеплением климата // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2003. № 9. С. 98–103. Zhmylev P.Yu., Zhmyleva A.P., Karpukhina E.A., Titovets A.V. Possible Reasons for Changes in the Seasonal Plant Development in Connection with Climate Warming. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Russian Journal of Ecology and Life Safety], 2003, no. 9, pp. 98–103.

3. Лапин П.И. Сезонный ритм развития древесных растений и его значение для интродукции // Бюл. Глав. ботан. сада. 1967. Вып. 65. С. 13–18. Lapin P.I. Seasonal Rythm of Woody Plant Development and Its Role in Introduction. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1967, iss. 65, pp. 13–18.

4. Мазена В.С., Шиятов С.Г. Изменения климата и динамика плотности притундровых редколесий на верхней границе леса на Полярном Урале за последнее тысячелетие //

Бюл. Рос. нац. ком. по Междунар. геосферно-биосферной программе. 2003. № 2. С. 20–21. Mazepa V.S., Shiyatov S.G. Climate Changes and Density Dynamics of Tundra Sparse Forests on the Upper Forest Border in the Polar Urals for the Last Millennium. *Byulleten' Rossiyskogo natsional'nogo komiteta po mezhdunarodnoy geosferno-biosfernoy programme*, 2003, no. 2, pp. 20–21.

5. Моисеев П.А., Ван дер Меер М., Риглинг А., Шевченко И.Г. Влияние изменений климата на формирование поколений ели сибирской в подгольцовых древостоях Южного Урала // Экология. 2004. № 3. С. 163–171. Moiseev P.A., Shevchenko I.G., Meer M.V.D., Rigling A. Effect of Climatic Changes on the Formation of Siberian Spruce Generations in Subglotsy Tree Stands of the Southern Urals. *Ekologia* [Russian Journal of Ecology], 2004, no. 3, pp. 163–171.

6. Моисеев П.А., Гайсин И.К., Бубнов М.О., Моисеева О.О. Динамика древесной растительности на участках остепненных склонов Южного Крака в последние 80 лет // Экология. 2018. № 2. С. 157–162. Moiseev P.A., Bubnov M.O., Moiseeva O.O., Gaisin I.K. Dynamics of Tree Vegetation in Steppified Areas on the Slopes of the Southern Kraka Massif during the Past 80 Years. *Ekologia* [Russian Journal of Ecology], 2018, no. 2, pp. 157–162. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367059718020105>

7. Фадеева И.В., Фирсов Г.А., Булыгин Н.Е. Биоклиматическая цикличность в Санкт-Петербурге в конце XX в. и ее влияние на интродуцированную и местную дендрофлору // Ботан. журн. 2009. Т. 94, № 9. С. 1351–1358. Fadeyeva I.V., Firsov G.A., Bulygin N.E. Bioclimatic Cyclicality in Saint Petersburg in the Late 20th Century, and Its Influence on Introduced and Native Dendroflora. *Botanicheskii Zhurnal*, 2009, vol. 94, no. 9, pp. 1351–1358.

8. Фирсов Г.А., Волчанская А.В., Фадеева И.В. Уровни адаптированности древесных видов растений Красной книги России, интродуцированных в Санкт-Петербурге, в условиях изменения климата // Вестн. ВолГУ. Сер. 11: Естеств. науки. 2012. № 2(4). С. 16–27. Firsov G.A., Volchanskaya A.V., Fadeyeva I.V. Levels of Adaptation of Woody Species of Red Data Book of Russia in St.-Petersburg in the Age of Climate Change. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 11. Estestvennyye nauki* [Science of VolSU. Natural sciences], 2012, no. 2(4), pp. 16–27.

9. Фирсов Г.А., Фадеева И.В., Волчанская А.В. Влияние метео-фенологической аномалии зимы 2006/07 года на древесные растения в Санкт-Петербурге // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2008. № 6. С. 22–28. Firsov G.A., Fadeyeva I.V., Volchanskaya A.V. Influence of Meteor-Phenological Anomaly of Winter 2006/07 on Arboreal Plants at Saint-Petersburg. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2008, no. 6, pp. 22–28.

10. Фирсов Г.А., Фадеева И.В., Волчанская А.В. Фенологическое состояние древесных растений в садах и парках С.-Петербурга в связи с изменениями климата // Ботан. журн. 2010. Т. 95, № 1. С. 23–37. Firsov G.A., Fadeyeva I.V., Volchanskaya A.V. Phenological State of Arboreal Plants in Gardens and Parks of St. Petersburg in the Context of Climatic Changes. *Botanicheskii Zhurnal*, 2010, vol. 95, no. 1, pp. 23–37.

11. Хантемиров Р.М., Горланова Л.А., Сурков А.Ю., Шиятов С.Г. Экстремальные климатические события на Ямале за последние 4100 лет по дендрохронологическим данным // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2011. № 2. С. 89–102. Hantemirov R.M., Gorlanova L.A., Surkov A.Yu., Shiyatov S.G. Extreme Climate Events in Yamal for the Last 4100 Years According to Dendrochronological Data. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2011, no. 2, pp. 89–102.

12. Шиятов С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с. Shiyatov S.G. *Dynamics of Woody and Shrub Vegetation in the Polar Urals under the Influence of Current Climate Change*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2009. 216 p.

13. Шиятов С.Г., Мазена В.С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // Лесоведение. 2007. № 6. С. 11–22. Shiyatov S.G., Mazena V.S. Climate-Driven Dynamics of the Forest-Tundra Vegetation in the Polar Ural Mountains. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 6, pp. 11–22.

14. Шмидт С.В. Биологические эффекты температурного воздействия на растения // Вестн. БФУ им. И. Канта. 2012. Вып. 7. С. 122–127. Schmidt S.V. The Biological Effects of Thermal Impact on Plants. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta* [IKBFU's Vestnik Natural and medical sciences], 2012, iss. 7, pp. 122–127.

15. Clark R.M., Thompson R. Predicting the Impact of Global Warming on the Timing of Spring Flowering. *International Journal of Climatology*, 2010, vol. 30, iss. 11, pp. 1599–1613. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2004>

16. Cleland E.E., Chuine I., Menzel A., Mooney H.A., Schwartz M.D. Shifting Plant Phenology in Response to Global Change. *Trends in Ecology and Evolution*, 2007, vol. 22, iss. 7, pp. 357–365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>

17. Fitter A.H., Fitter R.S.R. Rapid Changes in Flowering Time in British Plants. *Science*, 2002, vol. 296, no. 5573, pp. 1689–1691. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1071617>

18. Hagedorn F., Shiyatov S.G., Mazena V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Bartysh A.A. et al. Treeline Advances along the Urals Mountain Range – Driven by Improved Winter Conditions? *Global Change Biology*, 2014, vol. 20, iss. 11, pp. 3530–3543. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>

19. Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Duncan R.P. Are Treelines Advancing? A Global Meta-Analysis of Treeline Response to Climate Warming. *Ecology Letters*, 2009, vol. 12, iss. 10, pp. 1040–1049. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>

20. Memmott J., Craze P.G., Waser N.M., Price M.V. Global Warming and the Disruption of Plant – Pollinator Interactions. *Ecology Letters*, 2007, vol. 10, iss. 8, pp. 710–717. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01061.x>

21. Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R. et al. European Phenological Response to Climate Change Matches the Warming Pattern. *Global Change Biology*, 2006, vol. 12, iss. 10, pp. 1969–1976. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>

УДК 630\*6

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-110-120

**ЛЕСОВОДСТВЕННО-ХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОБЪЕКТОВ  
БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ****С.А. Корчагов<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.;** ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>**Р.С. Хамитов<sup>2</sup>, д-р с.-х. наук, проф.;** ResearcherID: [Z-1461-2018](https://orcid.org/0000-0003-1490-3553),ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1490-3553>**С.Е. Грибов<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.;** ResearcherID: [AAY-2692-2021](https://orcid.org/0000-0002-0145-6136),ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0145-6136>**М.Г. Иванова (Комисарова)<sup>3</sup>, соискатель;**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4164-2977>**Д.В. Беляков<sup>2,4</sup>, аспирант;** ResearcherID: [AAX-2399-2021](https://orcid.org/0000-0003-2588-1492),ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2588-1492><sup>1</sup>Вологодский государственный университет, ул. Ленина, д. 15, г. Вологда, Россия, 160000; e-mail: kors45@yandex.ru<sup>2</sup>Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Панкратова, д. 9 а, корп. 7, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; e-mail: r.s.khamitov@mail.ru, belyakovdima09111995@yandex.ru<sup>3</sup>Череповецкий государственный университет, просп. Луначарского, д. 5, г. Череповец, Вологодская обл., Россия, 162600; e-mail: ms.mgivanova@mail.ru<sup>4</sup>Вологодский селекционно-семеноводческий лесохозяйственный центр – филиал специализированного автономного учреждения лесного хозяйства Вологодской области «Вологодское лесохозяйственное объединение», ул. Преображенского, д. 28 б, г. Вологда, Россия, 160026; e-mail: belyakovdima09111995@yandex.ru

---

**Оригинальная статья / Поступила в редакцию 29.04.20 / Принята к печати 30.06.20**

---

**Аннотация.** Сохранение биологического разнообразия в лесных насаждениях, прежде всего при промышленных рубках, в современных условиях является одной из важнейших задач лесного хозяйства. В большинстве стран с развитым лесным комплексом (Швеция, Финляндия и др.) эта задача также остается актуальной. Решение данного вопроса приоритетно в государственной лесной политике наравне с обеспечением лесной промышленности необходимыми объемами сырья. Основные требования по сохранению биоразнообразия в нашей стране закреплены в национальном стандарте, регулирующем добровольную лесную сертификацию. В Вологодской области организация лесопользования осуществляется с учетом значимых аспектов сохранения биологического разнообразия. Цель исследования – лесоводственно-экономическая оценка объектов биоразнообразия, сохраняемых на локальном уровне в таежной зоне (на примере Вологодской области). Оценку проводили на основе таксационной характеристики, полученной в ходе полевых исследований. Для осуществления экономической оценки сохранения ключевых объектов использовали методические положения Е.А. Рай, С.И. Сланикова. Сравнение объемов затрат на заготовку древесины в биотопах и доходов от ее реализации (в случае рубки древостоев на участках ключевых биотопов с последующей реализацией полученной древесины) продемонстрировало существенные отличия между рассматриваемыми объектами. Показано, что по сортиментной структуре значительная часть исследованных биотопов приходится на дровяную древесину. Стоимость древесины варьирует от 9,6 до 529,5 тыс. р. При возможной вырубке ключевых биотопов объем затрат на различных участках будет существенно изменчив – от 9,0 до 340,5 тыс. р. Вместе с этим отрицательный финансовый результат отмечается лишь

---

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

на одном объекте (участок леса с местообитанием неkkerы перистой, включенной в Красную книгу Вологодской области). Результаты демонстрируют, что выделение ключевых объектов и их дальнейшее сохранение экологически обосновано, однако в ряде случаев (при сопоставлении с доходом от их вырубки) экономически не оправдано.

**Для цитирования:** Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Грибов С.Е., Иванова М.Г., Беляков Д.В. Лесоводственно-хозяйственная оценка объектов биологического разнообразия в таежной зоне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С.110–120. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-110-120

**Ключевые слова:** биологическое разнообразие, экосистема, лесозаготовительные работы, ключевой биотоп, лесоводственно-экономическая оценка.

## FOREST MANAGEMENT ASSESSMENT OF BIODIVERSITY IN THE TAIGA ZONE

**Sergei A. Korchagov**<sup>1</sup>, *Doctor of Agriculture, Prof.;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>

**Renat S. Khamitov**<sup>2</sup>, *Doctor of Agriculture, Prof.;* *ResearcherID:* [Z-1461-2018](https://orcid.org/0000-0003-1490-3553),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1490-3553>

**Sergey E. Gribov**<sup>2</sup>, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;* *ResearcherID:* [AAY-2692-2021](https://orcid.org/0000-0002-0145-6136),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0145-6136>

**Margarita G. Ivanova (Komisarova)**<sup>3</sup>, *External PhD Student;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4164-2977>

**Dmitry V. Belyakov**<sup>2,4</sup>, *Postgraduate Student;* *ResearcherID:* [AAX-2399-2021](https://orcid.org/0000-0003-2588-1492),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2588-1492>

<sup>1</sup>Vologda State University, ul. Lenina, 15, Vologda, 160000, Russian Federation; e-mail: kors45@yandex.ru

<sup>2</sup>Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, ul. Pankratova, 9a, korp. 7, s. Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: r.s.khamitov@mail.ru, belyakovdima09111995@yandex.ru

<sup>3</sup>Cherepovets State University, prosp. Lunacharskogo, 5, Cherepovets, Vologda Region, 162600, Russian Federation; e-mail: ms.mgivanova@mail.ru

<sup>4</sup>Vologda Selection and Seed-Growing Centre – Branch of the ACS of forestry “Vologdaleskhoz”, ul. Preobrazhenskogo, 28b, Vologda, 160026, Russian Federation; e-mail: belyakovdima09111995@yandex.ru

---

**Original article** / Received on April 29, 2020 / Accepted on June 30, 2020

---

**Abstract.** The need to preserve biodiversity has been recognized for decades, even centuries in North America, Europe and some other regions of the world. Importance of preserving species and wildlife areas is emphasized in many cultures. Preservation of biodiversity in forest management, and especially in industrial logging, is one of the most important tasks of modern forestry. In many countries with the developed forest complex (Finland, Sweden, etc.), the task of preserving natural biodiversity has the same priority in the state forest policy as providing the forest industry with wood raw materials. The main requirements for the biodiversity preservation in Russia are enshrined in the National Standard (Forest Code of the Russian Federation, article 1) governing Voluntary Forest Certification. Organization of forest management in the Vologda region is carried out with consideration of significant aspects of biodiversity preservation. The research purpose is the forestry and economic assessment of biodiversity at the local level in the taiga zone (case study of the Vologda region). The assessment was carried out based on the inventory characteristic obtained in the field

---

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

studies. The methodological provisions of E.A. Rai and S.I. Slastnikov were used to perform economic assessment of the preservation of key objects. A comparison of the costs of timber logging in biotopes and the income from its sale (in the case of logging stands in key biotopes with the subsequent sale of the resulting timber) showed significant differences between the objects under consideration. It is shown that according to the assortment structure, a significant part of the studied biotopes accrue to firewood. The cost of timber varies from 9.6 to 529.5 rubles. The amount of costs at different sites will vary significantly from 9.0 to 340.5 rubles due to the possible cutting of key biotopes. At the same time, a negative financial result is observed only at one site (a forest site with a habitat of *Neckera pennata*, which is included in the Red Data Book of the Vologda Region). The results demonstrate that the allocation of key sites and their further preservation is environmentally sound, but in some cases (when compared with the income from their cutting) is not commercially justified.

**For citation:** Korchagov S.A., Khamitov R.S., Gribov S.E., Ivanova M.G., Belyakov D.V. Forest Management Assessment of Biodiversity in the Taiga Zone. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 110–120. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-110-120

**Keywords:** biodiversity, ecosystem, logging operations, key biotope, forestry and economic assessment.

### Введение

Вологодская область по наличию древесных ресурсов занимает одно из ведущих мест среди регионов России. Согласно ведомственной информации Департамента лесного комплекса Вологодской области, площадь лесных земель составляет около 11,7 млн га, или 81 % от территории всего субъекта федерации. Лесная растительность при этом занимает 9,9 млн га. Общий запас насаждений на землях лесного фонда – 1594,61 млн м<sup>3</sup>, в т. ч. запас спелых и перестойных лесов – 1065,92 млн м<sup>3</sup>. Установленный ежегодный объем заготовки древесины по лесным участкам, которые переданы лесопромышленным предприятиям в аренду, может достигать 18,25 млн м<sup>3</sup> (61,4 % от расчетной лесосеки области). По итогам 2020 г. заготовка древесины осуществлена в объеме 17,7 млн м<sup>3</sup> (59,5 % от расчетной лесосеки), из них 75 % направлено на глубокую переработку [9].

Масштабные вырубki древесины требуют устойчивого управления лесным фондом, что невозможно без принятия во внимание задачи по сохранению объектов биологического разнообразия и рациональному использованию всех лесных ресурсов. К мысли о необходимости сохранения природного биоразнообразия человеческое общество пришло уже достаточно давно. Вместе с этим во многих странах проблема сохранения естественных экосистем и уголков дикой природы имеет первостепенное значение. Следует учитывать, что биоразнообразие включает как разнообразие собственно видов флоры и фауны, так и целых экосистем и отдельных ландшафтов [5, 12]. В этом аспекте организация комплекса мероприятий по сохранению мест естественных обитаний, обеспечивающих существование организмов и различных типов их сообществ, является важнейшей целью устойчивого лесопользования [17]. Достижение данной цели возможно путем поддержания не только отдельных видов, особенно тех, экология которых изучена лучше других, но и в целом их сообществ. Для обеспечения биоразнообразия во всей его полноте, в том случае, когда лесохозяйственную деятельность развивают целенаправленно, сбережение мозаичности естественных местообитаний становится единственным возможным подходом [15, 16, 19].

Сложившаяся парадигма лесопользования подразумевает отношение к лесу не только как к источнику древесного сырья, но и как к целостной экоси-

стеме [10]. При этом современная организация лесопользования сохраняет множество факторов, оказывающих негативное воздействие на лесные экосистемы, что и влечет за собой сокращение видового разнообразия живых организмов.

Причиной негативного воздействия на местообитания видов является связанная с глобальной экономикой и осуществляемая в крупных масштабах промышленная или предпринимательская деятельность, которая нацелена на получение максимальной прибыли: плантационное сельское хозяйство, скотоводство, коммерческое рыболовство, обрабатывающая промышленность, лесоводство [20].

Достижению целей сохранения видового разнообразия служит Конвенция о биологическом разнообразии. Этот международный договор, заключенный в 1992 г. и подписанный правительствами 189 стран, включая и Российскую Федерацию, принявшую его положения в 1995 г., декларирует принципы сбережения биоразнообразия, приоритет неистощительного использования лесных ресурсов как неотъемлемых компонентов естественных экосистем, а также солидарное и справедливое распределение получаемых при потреблении генофонда лесных ресурсов выгод [3, 4].

Кроме того, основные и важнейшие нормы по сохранению биоразнообразия рассматриваются международным сообществом в качестве индикаторов и критериев устойчивого управления лесами (Хельсинкский и Монреальский процессы). Поскольку Россия своевременно присоединилась к данным процессам [8], ее международные обязательства также способствуют объективной оценке степени сохранения биологического разнообразия лесных сообществ и вклада насаждений в поддержание углеродного баланса. Заметной вехой развития принципов и институтов сохранения биологического разнообразия стало возникновение в 1993 г. в канадском Торонто Лесного попечительского Совета (Forest Stewardship council). Современные требования по сбережению биоразнообразия в нашей стране обстоятельно аргументированы и закреплены в национальном стандарте, регулирующем добровольную лесную сертификацию [10]. Сохранение биоразнообразия является приоритетным вопросом в государственной лесной политике, как и обеспечение лесной промышленности необходимыми объемами сырья. Кроме того, одна из основных задач российского законодательства – сохранение биоразнообразия лесных экосистем (Лесной кодекс РФ, ст. 1) [13].

Организация лесопользования в Вологодской области осуществляется с учетом значимых аспектов сохранения биологического разнообразия. Подробные перечни, в которых отражены наименования объектов биологического разнообразия, характеристики и размеры буферных зон, приведены в лесохозяйственных регламентах территориальных лесничеств Департамента лесного комплекса. Отдельные, но весьма важные подходы к сохранению биоразнообразия на локальном уровне нашли отражение и в Методических рекомендациях по сохранению биологического разнообразия при заготовке древесины в Вологодской области [3, 6, 7].

Целью исследования является лесоводственно-экономическая оценка объектов биологического разнообразия (ключевых биотопов), сохраняемых при сплошных рубках в условиях Вологодской области.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые на лесных участках, отведенных под сплошные рубки, для выделенных ключевых биотопов определены лесоводственные и экономические показатели, позволяющие судить о необходимости и целесообразности сохранения этих биотопов. Результаты могут быть использованы при разработке и обосновании мероприятий по сохранению ключевых биотопов при проектировании сплошных рубок.

## Объекты и методы исследования

Лесные участки расположены в Грязовецком, Верховажском и Вологодском районах Вологодской области. Объектами исследования являлись выделенные в ходе отвода лесосек ключевые биотопы (табл. 1).

Таблица 1

## Перечень объектов исследования

| № | Наименование   | Район        |
|---|--|--------------|
| 1 | Участок леса вокруг временного водного объекта   | Грязовецкий  |
| 2 | Участок леса вокруг временного водного объекта   | Верховажский |
| 3 | Участок леса вокруг временного водного объекта   | Вологодский  |
| 4 | Участок леса вокруг временного водного объекта   | Вологодский  |
| 5 | Участок леса с местообитанием Неккеры перистой ( <i>Neckera pennata</i> ), включенной в Красную книгу Вологодской области  | Грязовецкий  |
| 6 | Участок леса с местообитанием Неккеры перистой ( <i>Neckera pennata</i> ) и лишайника Лобарии легочной ( <i>Lobaria pulmonaria</i> ), включенных в Красную книгу Вологодской области | Верховажский |
| 7 | Окно распада со скоплениями валежа и ветровально-почвенными комплексами  | Вологодский  |

При планировании работ по заготовке древесины на лесных участках предполагался следующий комплекс мер, направленных на сохранение ключевых биотопов. На участках 1–4 вдоль временного водотока по каждой стороне от него на расстоянии 20 м оставляют буферные зоны, которые имеют слабо выраженное русло и характерные ландшафтные границы. Русло заполняется водой только в период паводков и половодий, в остальное время пересыхает. В 5-м и 6-м биотопах сохраняют буферную зону диаметром 20 м вокруг центра сосредоточения редких и исчезающих видов – группы мхов и лишайников на осинах. На 7-м участке объект сохраняют в пределах его естественных границ, т. е. в черте участка среди лесного насаждения, где прошел ветровал и наблюдалась разная степень разложения отпавших деревьев и был сохранившийся подрост. Отмирание одного дерева или небольших групп деревьев приводит к формированию «окон» в пологе леса, в которых создаются благоприятные условия для развития подроста деревьев, кустарников и травянистой растительности [3, 14, 18, 21].

В границах рассматриваемых биотопов нами выполнен сплошной перебор деревьев по ступеням толщины стволов на высоте 1,3 м в разрезе категорий технической годности. Для определения средней высоты насаждения у отдельных деревьев, отобранных пропорционально представленности ступеней толщины стволов, измеряли высоту. Лесоводственно-таксационная характеристика насаждений дана по общепринятым в лесной таксации методам [2]. Результаты работ по таксации служили основанием для выявления сортиментной структуры древостоя [1]. Для осуществления экономической оценки мероприятий по сохранению ключевых объектов использовали методические положения, предложенные Е.А. Рай, С.И. Слестниковым [11].

## Результаты исследования и их обсуждение

Исследуемые объекты существенно варьируют по лесоводственно-таксационной характеристике (табл. 2).

Таблица 2

## Лесоводственно-таксационная характеристика исследуемых объектов

| Показатель   | Значение в ключевых биотопах |                          |                               |                           |                     |                          |                             |
|--|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|
|  | 1                            | 2                        | 3                             | 4                         | 5                   | 6                        | 7                           |
| Площадь, га  | 0,35                         | 0,54                     | 1,50                          | 1,40                      | 0,25                | 0,41                     | 0,10                        |
| Состав древостоя   | 4ЕЗБЗОс                      | 6Е4Б+Ос                  | 5С4Е1Б<br>+Ос+Ол <sub>с</sub> | 5С2Е2Б1Ос+Ол <sub>с</sub> | 5Б4Ос1Е             | 4Ос3ЕЗБ                  | 3Ол <sub>с</sub> 2Б2Ос3Е+Ив |
| Возраст, лет   | 95                           | 90                       | 85                            | 85                        | 85                  | 75                       | 60                          |
| Средний диаметр, см  | 28                           | 20                       | 28                            | 32                        | 24                  | 34                       | 16                          |
| Средняя высота, м  | 25                           | 19                       | 24                            | 24                        | 24                  | 28                       | 16                          |
| Бонитет  | II                           | III                      | II                            | II                        | I                   | Ia                       | III                         |
| Тип леса   | Ельник<br>кисличный          | Ельник<br>чернич-<br>ный | Сосняк<br>чернич-<br>ный      | Сосняк<br>черничный       | Ельник<br>кисличный | Ельник<br>кислич-<br>ный | Ельник<br>кисличный         |
| Полнота  | 0,7                          | 0,6                      | 0,4                           | 0,5                       | 0,8                 | 0,3                      | 0,3                         |
| Запас ликвидной древесины<br>на всей площади биотопа, м <sup>3</sup> | 40,9                         | 66,0                     | 186,0                         | 227,0                     | 104,6               | 42,0                     | 6,0                         |

Древостои в ключевых биотопах произрастают в черничных и кисличных лесорастительных условиях, характеризуются Ia–III классом бонитета и относительной полнотой 0,3–0,8. На участке 6 после рубки леса был ветровал ели, что привело к существенному снижению полноты.

Для экономической оценки целесообразности мероприятий по сохранению ключевых биотопов осуществлен расчет сортиментной структуры древостоев и стоимости древесины, не подлежащей рубке (табл. 3).

Таблица 3

**Оценка сортиментной структуры древостоев и стоимости древесины, сохраненной в ключевых биотопах**

| Сортиментная структура                        | Цена за единицу, р./м³* | Объем выпуска, м³/стоимость, р., в ключевых биотопах |                        |                         |                         |                         |                       |                    |
|---|-------------------------|--|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
|   |                         | 1  | 2                      | 3                       | 4                       | 5                       | 6                     | 7                  |
| Бревна сосновые для распиловки и строгания    | 3700,0                  | –  | –                      | <u>63,0</u><br>233 100  | <u>79,0</u><br>292 300  | –                       | –                     | –                  |
| Бревна еловые для распиловки и строгания      | 3800,0                  | <u>10,1</u><br>38 380                                | <u>17,1</u><br>64 980  | <u>33,0</u><br>125 400  | <u>31,0</u><br>117 800  | <u>2,9</u><br>11 020    | <u>8,0</u><br>30 400  | <u>1,0</u><br>3800 |
| Бревна березовые для выработки лущеного шпона | 3000,0                  | <u>6,0</u><br>18 000                                 | <u>11,0</u><br>33 000  | <u>12,0</u><br>36 000   | <u>15,0</u><br>45 000   | <u>10,5</u><br>31 500   | <u>4,0</u><br>12 000  | <u>1,0</u><br>3000 |
| Балансы сосновые                              | 1200,0                  | –  | –                      | <u>7,0</u><br>8400      | <u>5,0</u><br>6000      | –                       | –                     | –                  |
| Балансы еловые                                | 1300,0                  | <u>3,8</u><br>4940                                   | <u>13,3</u><br>17 290  | <u>9,0</u><br>11 700    | <u>6,0</u><br>7800      | <u>2,3</u><br>2990      | <u>2,0</u><br>2600    | –                  |
| Балансы березовые                             | 900,0                   | <u>0,5</u><br>4500                                   | <u>2,4</u><br>2160     | <u>1,0</u><br>900       | <u>2,0</u><br>1800      | <u>1,1</u><br>990       | <u>1,0</u><br>900     | –                  |
| Дровяная древесина                            | 700,0                   | <u>20,5</u><br>14 350                                | <u>22,2</u><br>15 540  | <u>61,0</u><br>42 700   | <u>89,0</u><br>58 800   | <u>87,8</u><br>61 460   | <u>27,0</u><br>18 900 | <u>4,0</u><br>2800 |
| <i>Итого</i>                                  | –                       | <u>40,9</u><br>80 170                                | <u>66,0</u><br>132 970 | <u>186,0</u><br>458 200 | <u>227,0</u><br>529 500 | <u>104,6</u><br>107 960 | <u>42,0</u><br>64 800 | <u>6,0</u><br>9600 |

\* При оценке стоимости 1 м³ древесины использована ее средняя рыночная стоимость в Вологодской области на момент проведения расчетов.

Расчеты показывают, что в ключевых биотопах значительна доля дровяной древесины (биотоп 1 – 50,1 %; 2 – 33,6 %; 3 – 32,8 %; 4 – 39,2 %; 5 – 83,9 %; 6 – 64,3; 7 – 66,7 %). Стоимость древесины в биотопах составляет от 9,6 до 529,5 тыс. р.

В табл. 4 представлены финансовые затраты на заготовку и вывозку древесины на объектах исследования (в случае их вырубке при осуществлении лесо-

Таблица 4

## Предполагаемые затраты на заготовку древесины в ключевых биотопах

| Вид затрат                                 | Стоимость единицы работ, р./м <sup>3</sup> * | Стоимость работ в ключевых биотопах, р. |        |         |         |         |        |      |
|--|--|---|--------|---------|---------|---------|--------|------|
|  |  | 1                                       | 2      | 3       | 4       | 5       | 6      | 7    |
| Заготовка и треловка древесины             | 500  | 20 450                                  | 33 000 | 93 000  | 113 500 | 52 300  | 21 000 | 3000 |
| Вывозка древесины до грунтовой дороги      | 400  | 16 360                                  | 26 400 | 74 400  | 90 800  | 41 840  | 16 800 | 2400 |
| Вывозка древесины до конечного потребителя | 600  | 24 540                                  | 39 600 | 111 600 | 136 200 | 62 760  | 25 200 | 3600 |
| <i>Итого</i>                               | 1500   | 61 350                                  | 99 000 | 279 000 | 340 500 | 156 900 | 63 000 | 9000 |

\*При оценке стоимости заготовки и вывозки 1 м<sup>3</sup> древесины использована средняя рыночная стоимость осуществления этих работ в Вологодской области на момент проведения расчетов.

заготовительных работ). При расчетах проектировали заготовку древесины комплексом лесозаготовительных машин, включающим харвестер и форвардер, вывозку сортиментов (на расстояние 65 км) предполагали осуществлять автомобилем с гидроманипулятором.

Расчеты позволили выявить, что объем затрат на заготовку и вывозку древесины при вырубке ключевых биотопов на различных участках будет существенно варьировать – от 9,0 до 340,6 тыс. р.

Оценка объемов затрат на заготовку древесины в биотопах и доходов от ее реализации (в случае теоретической рубки древостоев на участках ключевых биотопов с последующей реализацией полученной древесины) показала выраженные отличия между исследуемыми участками.

Подводя итоги, можно заключить, что заготовка древесного сырья на участках ключевых биотопов и его реализация обеспечивают прибыль от 0,6 до 189,0 тыс. р. и являются экономически оправданными. Наибольшая финансовая выгода достигается при вырубке участков вокруг временных водных объектов.

Для ключевого биотопа 5 отмечен отрицательный финансовый результат, т. е. убыток от заготовки и реализации древесины, что связано с наличием значительного объема дровяной древесины в биотопе.

Таблица 5

**Финансовая оценка затрат на заготовку древесины на площадях ключевых биотопов и ее реализацию**

| № | Затраты на заготовку древесины, р. | Доходы от реализации древесины, р. | Финансовый результат, р. |
|---|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 61 350                             | 80 170                             | +18 820                  |
| 2 | 99 000                             | 132 970                            | +33 970                  |
| 3 | 279 000                            | 458 200                            | +179 200                 |
| 4 | 340 500                            | 529 500                            | +189 000                 |
| 5 | 156 900                            | 107 960                            | -48 940                  |
| 6 | 63 000                             | 64 800                             | +1800                    |
| 7 | 9000                               | 9600                               | +600                     |

*Заключение*

По сортиментной структуре значительная часть ключевых биотопов приходится на дровяную древесину. Стоимость древесины в них составляет от 9,6 до 529,5 тыс. р. В случае вырубки ключевых биотопов объем затрат на различных участках будет варьировать от 9,0 до 340,5 тыс. р.

Результаты исследования являются отправной точкой в проведении лесоводственной и экономической оценки сохраняемых ключевых биотопов в таежной зоне. Выявлено, что в ряде случаев сохранение ключевых биотопов не выгодно с экономической позиции. Однако оставление участков ключевых биотопов при заготовке древесины способствует сохранению биологического разнообразия и поддержанию численности популяций редких и исчезающих видов, т. е. становится одним из важных мероприятий при организации экологически устойчивого лесопользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Анучин Н.П.* Сортиментные и товарные таблицы. 6-е изд. М.: Лесн. пром-сть, 1968. 480 с. Anuchin, N.P. *Sorting and Commodity Tables*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1968. 480 p.
2. *Анучин Н.П.* Лесная таксация. 6-е изд. М.: ВНИИЛМ, 2004. 552 с. Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 552 p.
3. *Беляков Д.В., Корчагов С.А.* Лесоводственно-экономическая оценка сохранения объектов биологического разнообразия в Балтийско-Белозерском таежном районе // Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Киров: ВятГУ, 2019. С. 224–229. Belyakov D.V., Korchagov S.A. *Forestry and Economic Assessment of the Conservation of Biodiversity Objects in the Baltic-Belozersk Taiga Region. Conservation of Forest Ecosystems: Problems and Solutions. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Kirov, VyatSU Publ., 2019, pp. 224–229.

4. Конвенция о биологическом разнообразии. Рио-де-Жанейро, 1992; ратифицирована Федер. законом РФ от 17 февр. 1995 г. № 16-ФЗ. Режим доступа: [http://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/biodiv.shtml](http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/biodiv.shtml) (дата обращения: 29.10.21). *Convention on Biological Diversity: Ratified by the Federal Law of the Russian Federation of February 17, 1995, No. 16-FZ. Rio de Janeiro, 1992.*

5. Красная книга Вологодской области. Т. 2. Растения и грибы / отв. ред. Г.Ю. Конечная, Т.А. Сулова. Вологда: ВГПИУ: Русь, 2004. 360 с. *Red Data Book of the Vologda Region. Vol. 2. Plants and Mushrooms. Ed. by G.Yu. Konechnaya, T.A. Suslova. Vologda, VSPU, Rus' Publ., 2004. 360 p.*

6. Лесохозяйственный регламент Вологодского лесничества Вологодской области: утв. приказом Департамента лесного комплекса области от 26 окт. 2018 г. № 1606. Вологда, 2018. 141 с. *Forest Management Regulations of the Vologda Forestry in the Vologda Region: Approved by the Order of the Department of Forest Complex of the Region of October 16, 2018 No. 1540. Vologda, 2018. 141 p.*

7. Методические рекомендации по сохранению биологического разнообразия при заготовке древесины в Вологодской области: утв. начальником Департамента лесного комплекса Вологодской области Сипяговым В.С.; согласованы начальником Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области А.М. Завгородним. Вологда, 2014. 21 с. *Instructional Guidelines for Biodiversity Conservation during Logging in the Vologda Region. Vologda, 2014. 21 p.*

8. Приказ Рослесхоза от 5 февр. 1998 г. № 21 «Об утверждении Критериев и индикаторов устойчивого управления лесами Российской Федерации». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=323357#06304207146760543> (дата обращения: 29.10.21). *Order of Rosleskhov of February 5, 1998 No. 21 "On Approval of Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management of the Russian Federation".*

9. Публичный доклад о результатах деятельности Департамента лесного комплекса Вологодской области за 2018 г. // Проект «Команда Губернатора: Ваша оценка». Вологда, 2019. 56 с. *Public Report on the Results of the Department of Forest Complex of the Vologda Region for 2018. Project "The Governor's Team: Your Assessment". Vologda, 2019. 56 p.*

10. Российский национальный стандарт добровольной лесной сертификации по схеме FSC. FSC-STD-RUS-V6-1-2012. Российский национальный офис FSC, 2012. 199 с. *Russian National Standard for Voluntary Forest Certification under the FSC Certification Scheme. FSC-STD-RUS-V6-1-2012. FSC Russian National Office, 2012. 199 p.*

11. Сборник задач к учебному пособию «Основы устойчивого лесопользования» / сост. и общ. ред. А.В. Беляковой, Н.М. Шматкова. М.: WWF России, 2014. 139 с. *Collection of Tasks for the Textbook "Fundamentals of Sustainable Forest Management". Content by A.V. Belyakova, N.M. Shmatkov. Moscow, WWF Russia Publ., 2014. 139 p.*

12. Хорошун Н.А., Беляков Д.В., Королёва А.Л., Корчагов С.А. Экономическая оценка объектов биологического разнообразия при лесозаготовках в южно-таежном районе (на примере Вологодской области) // Актуальные проблемы лесовосстановления в таежной зоне: сб. тр. магистрантов и аспирантов по материалам науч.-практ. конф. Вологда– Молочное: ВГМХА, 2018. С. 78–81. Khoroshchn N.A., Belyakov D.V., Koroleva A.L., Korchagov S.A. Economic Assessment of Biodiversity Objects in Logging in the South Taiga Region (Case Study of the Vologda Region). *Current Issues of Reforestation in the Taiga Zone: Collection of Academic Papers of Master Degree Students and Postgraduate Students by Proceedings of Scientific and Practical Conference. Vologda–Molochnoe, Vologda SDFP Publ., 2018. 78–81 p.*

13. Ярошенко А. О сохранении биологического разнообразия при промышленных рубках леса // Лесн. бюл. 2004. № 25. Режим доступа:

- <http://old.forest.ru/rus/bulletin/25/6.html> (дата обращения: 29.10.21). Yaroshenko A. On conservation of Biodiversity in Industrial Logging. *Lesnoy byulleten'* [Forest Bulletin], 2004, no. 25.
14. Bergquist B. *Påverkan och skyddzoner vid vattendrag i skogs- och jordbrukslandskapet: En litteraturöversikt*. Fiskeriverket Rapport 1999:3. Göteborg, Sweden, Fiskeriverket, 1999. 118 p.
15. Callicott J.B. *Earth's Insights: A Multicultural Survey of Ecological Ethics from the Mediterranean Basin of the Australian Outback*. Berkeley, CA, University of California Press, 1994. 292 p. DOI: <https://doi.org/10.1525/9780520914827>
16. Hargrove E.C. *Foundations of Environmental Ethics*. Denton, TX, Environmental Ethics Book, 1989. 229 p.
17. 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: <https://doi.org/10.14214/sf.556>
18. Lilja S., Wallenius T., Kuuluvainen T. Structure and Development of Old *Picea abies* Forests in Northern Boreal Fennoscandia. *Écoscience*, 2006, vol. 13, iss. 2, pp. 181–192. DOI: <https://doi.org/10.2980/i1195-6860-13-2-181.1>
19. *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems*. Ed. by M.L. Hunter. Cambridge, Cambridge University Press, 1999. 698 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511613029>
20. Myers N. *Ultimate Security: The Environmental Basis of Political Stability*. Washington, DC, Island Press, 1996. 308 p.
21. Siitonen J. Forest Management, Coarse Woody Debris and Saproxylic Organisms: Fennoscandian Boreal Forests as an Example. *Ecological Bulletins*, 2001, no. 49, pp. 11–42.



УДК 630\*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ МАШИН С ПОЧВОГРУНТОМ ПРИ РАБОТЕ НА СКЛОНАХ

*С.Е. Рудов<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>*

*В.Я. Шапиро<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>*

*И.В. Григорьев<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>*

*О.А. Куницкая<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),*

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

*О.И. Григорьева<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),*

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

<sup>1</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru

<sup>3</sup>Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 23.10.20 / Принята к печати 15.01.21

---

**Аннотация.** Актуальность задачи эффективного освоения лесосек на склонах гор, сопкок и холмисто-рядовых рельефов обусловлена, прежде всего, истощением доступных спелых равнинных эксплуатационных лесов в Сибири и на Дальнем Востоке – в регионах, которые некогда не совсем корректно назывались лесозбыточными. Удобные для освоения эксплуатационные лесные массивы в Сибири и на Дальнем Востоке во многом исчерпаны. Для освоения новых необходимо масштабное дорожное строительство, что требует значительных финансовых затрат и уменьшает без того низкую рентабельность лесозаготовительного производства. Она снижается и из-за постоянно растущего плеча вывозки заготовленной древесины (даже если не брать во внимание затраты на строительство и содержание новой сети лесовозных дорог). Лесные экосистемы, расположенные на склонах, относятся к наиболее уязвимым. При работе в подобных условиях традиционных систем машин лесозаготовительного производства приходится нарезать серпантин волоков, которые в дальнейшем становятся концентраторами водной и ветровой эрозии. В настоящее время ведущими компаниями-производителями машин и оборудования для лесной отрасли – Ponsse, John Deere, Komatsu и др. – разработаны технические решения, существенно облегчающие работу комплексов лесных машин. К таким решениям относятся интегрированные в трансмиссии машин лебедки, использование отдельных самоходных лебедок на дистанционном управлении, осуществляемом оператором лесной машины, например T-winch. В этом случае машина не получает дополнительной массы от интегрированной в нее лебедки, однако негативное воздействие лесных машин на почвогрунты при этом никуда не уходит, но имеет свою существенную специфику. Показано, что при проведении лесосечных

---

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

работ на склонах, в первую очередь крутых, с превышающими 20–25° углами наклона, необходимо вносить коррективы в оценки характера разрушения массива почвогрунта и закономерностей формирования глубины колеи при воздействии трелевочной системы.

**Для цитирования:** Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134

**Ключевые слова:** леса на склонах, лесозаготовка, лесные машины, трелевочные системы, уплотнение почвогрунта, деформация почвогрунта.

### MODELING THE INTERACTION OF FOREST MACHINES WITH SOIL WHEN WORKING ON SLOPES

*Sergey E. Rudov*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

*Vladimir Ya. Shapiro*<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

*Igor V. Grigorev*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

*Olga A. Kunitskaya*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

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

*Olga I. Grigoreva*<sup>2</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

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

<sup>1</sup>Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru

<sup>3</sup>Arctic State Agrotechnological University, 3-y km, sh. Sergelyakhskoye, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

---

Original article / Received on October 23, 2020 / Accepted on January 15, 2021

---

**Abstract.** The urgency of the task of effective development of cutting areas on the slopes of mountains, hills, and hilly-ridge reliefs is primarily due to the depletion of available, special, lowland operational forests in Siberia and the Far East, which were once, not quite correctly, called forest-surplus regions of the Russian Federation. The operational woodlands that are convenient for development in Siberia and the Far East are largely depleted. To develop new ones, large-scale road construction is necessary, which requires significant financial expenses and reduces the already low profitability of logging production. It is also declining due to the ever-increasing volume of export of harvested timber, even if the cost of construction and maintenance of a new network of logging roads is not considered. Forest ecosystems located on slopes are among the most vulnerable. When working on the slopes with traditional systems of logging machines, it becomes necessary to cut a serpentine of skid trails, which later become concentrators of water and wind erosion. Currently, leading manufacturers of machinery and equipment for the forest industry, such as Ponsse, John Deer, Komatsu, and others, have developed technical solutions that significantly facilitate the operation of forest machine systems. Such solutions, first of all, include winches integrated into the transmissions of machines. Another solution is to use separate self-propelled winches remotely controlled

---

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

by the operator of a forest machine, for example, T-winch. In this case, the machine does not receive additional weight from the winch integrated into it; however, the negative impact of forest machines on soils does not disappear, but has its own significant specifics. The article shows that when performing logging operations on slopes, primarily steep ones with slope angles exceeding 20–25°, it is necessary to make adjustments to the assessment of the destruction nature of the soil array and the patterns of the track depth formation under the influence of the skidding system.

**For citation:** Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Modeling the Interaction of Forest Machines with Soil when Working on Slopes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134

**Keywords:** forests on slopes, logging, forest machines, skidding systems, soil compaction, soil deformation.

### Введение

В Дальневосточном федеральном округе (ДФО) значительные площади спелого древостоя сосредоточены не только на территориях с резко пересеченным рельефом и крутыми склонами, но и в местах с наличием сильно переувлажненных грунтов, заболоченности и топей [1–5] (рис. 1).

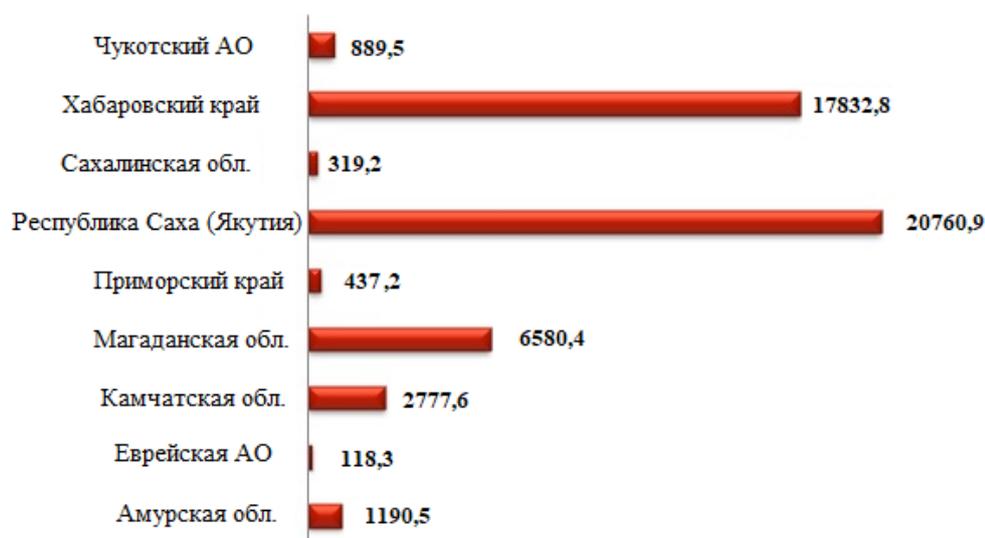


Рис. 1. Наличие в лесном фонде ДВФО лесоэксплуатационных территорий с сильно переувлажненными и заболоченными участками, тыс. га. [4]

Fig. 1. Availability in the forest fund of the Far Eastern Federal District of forest exploitation territories with highly waterlogged and swampy areas, ths ha [4]

Особенностью данных территорий является то, что основные площади, где произрастает качественный древостой, сосредоточены на крутых склонах, которые в нижней части нередко соприкасаются с гидрологическими системами (болотами, речками) [7]. В ДВФО на склонах с уклоном более 20° леса занимают больше 82 млн га, что составляет примерно 25 % лесопокрытой площади региона (табл. 1) [12].

Таблица 1

**Распределение лесопокрытых площадей по крутизне склона в субъектах ДВФО\***

| Субъект                  | Единица измерения площади | Всего      | До 20°     | 21°–30°   | 31° и более |
|--------------------------|---------------------------|------------|------------|-----------|-------------|
| Хабаровский край         | тыс. га                   | 50 924,20  | 36 105,25  | 10 694,08 | 4124,86     |
|                          | %                         | 100        | 70,9       | 21,0      | 8,1         |
| Приморский край          | тыс. га                   | 11 373,20  | 7824,76    | 2843,30   | 705,14      |
|                          | %                         | 100        | 68,8       | 25,0      | 6,2         |
| Амурская область         | тыс. га                   | 2654,00    | 15 676,57  | 5504,92   | 1472,51     |
|                          | %                         | 100        | 69,2       | 24,3      | 6,5         |
| Камчатский край          | тыс. га                   | 9004,50    | 4952,48    | 3115,56   | 936,47      |
|                          | %                         | 100        | 55,0       | 34,6      | 10,4        |
| Сахалинская область      | тыс. га                   | 5519,50    | 3366,90    | 1545,46   | 607,14      |
|                          | %                         | 100        | 61         | 28        | 11          |
| Республика Саха (Якутия) | тыс. га                   | 143 061,80 | 92 990,17  | 37 053,00 | 13 018,62   |
|                          | %                         | 100        | 65,0       | 25,9      | 9,1         |
| Еврейская АО             | тыс. га                   | 1563,10    | 1067,60    | 359,51    | 136,00      |
|                          | %                         | 100        | 68,30      | 23,00     | 8,70        |
| <i>Всего</i>             | тыс. га                   | 244 100,30 | 159 641,59 | 61 115,83 | 21 000,74   |
|                          | $\sum_{ср.}$ %            | 100        | 65,4       | 26,0      | 8,6         |

\*Без учета Магаданской области.

Другой важной составляющей, характеризующей лесные массивы на склонах, обычно является их протяженность и изрезанность перепадами высот, которые в совокупности будут составлять микро- и макронеровности эксплуатационной территории [8, 11].

В ДВФО резкий перепад высот на общей линии одного склона варьирует в пределах 5–10°, протяженность перепада достигает более 50 м (табл. 2).

Таблица 2

**Распределение горных лесных склонов ДВФО по протяженности и перепаду высот**

| Протяженность склона, м | Наличие по ДВФО (средние показатели), % | Перепады высот, %              |          |                                   |          |
|-------------------------|---|--------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|
|                         |   | Протяженность перепада до 50 м |          | Протяженность перепада более 50 м |          |
|                         |   | До 5°                          | Более 5° | До 5°                             | Более 5° |
| До 200                  | 15                                      | 14                             | 8        | 1                                 | 1        |
| До 400                  | 42                                      | 28                             | 7        | 11                                | 3        |
| До 600                  | 24                                      | 23                             | 11       | 9                                 | 6        |
| До 800                  | 13                                      | 24                             | 13       | 10                                | 8        |
| 1000 и более            | 9                                       | 25                             | 15       | 12                                | 10       |

В лесозаготовительной практике по перепаду высот принято выделять 3 основных вида рельефа (рис. 2): длинный склон, склон с гребнями и раздробленный склон.

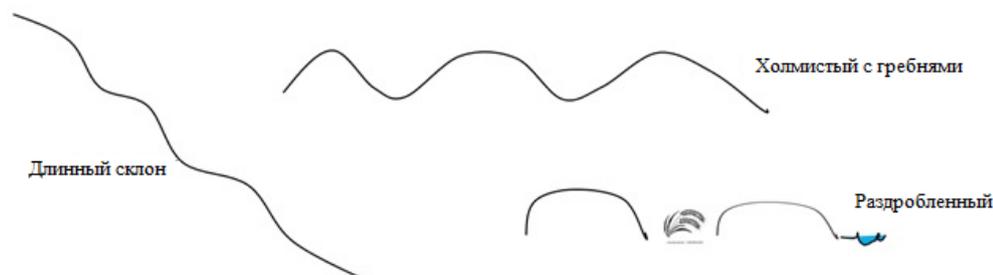


Рис. 2. Формы рельефа

Fig. 2. Relief forms

Труд вальщика леса, даже в равнинных лесах, физически тяжел и травмоопасен, а при работе на склонах тем более. В равнинных лесах России все большее распространение находит машинная заготовка древесины, которая при больших объемах работ и сплошных рубках спелых и перестойных насаждений оказывается выгоднее механизированной. Кроме того, наблюдается серьезный дефицит профессиональных вальщиков леса в связи с непрестижностью данной профессии у молодежи и тем, что многие опытные специалисты переучиваются на операторов лесных машин.

Машинная заготовка древесины на склонах имеет свои очевидные сложности как технические, так и технологические. Но альтернативы данному виду заготовки, даже в условиях крутых склонов, в настоящее время нет [7, 10].

Машинная валка деревьев на склонах возможна как сортиментными, так и хлыстовыми комплексами. При освоении лесосек на склонах наибольшую трудность представляет не валка деревьев, а их трелевка, причем она также входит в число наиболее опасных для экосистем леса операций [15, 18–23]. Лесозаготовители США и Канады применяют перемещение с лесосеки пакетов деревьев, сваленных валочно-пакетирующей машиной, вертолетами, но это, безусловно, очень затратный вариант.

Эксплуатация и техническое оснащение лесных машин в условиях работы на склоне имеют свои особенности. Как и в случаях работы на лесосеках со слабыми почвогрунтами, при работе на склонах колесные лесные машины надо оснастить правильным типом гусениц. Ведущие компании-производители машин для сортиментной заготовки – Ponsse, John Deere, Komatsu – предлагают технические решения, которые существенно повышают эффективность работы машин в таких условиях. Прежде всего, это установка специальной лебедки. Ponsse и John Deere по предварительному заказу оснащают уже готовые машины лебедками – на заводах, которые их производят. И, в принципе, такие лебедки могут быть установлены на весь модельный ряд машин этих компаний. У Komatsu лебедка интегрирована в трансмиссию, и машина собирается на заводе-производителе вокруг данной трансмиссии. Лебедочное оборудование является внутренней разработкой Komatsu, Ponsse и John Deere добавляют это оборудование к готовой машине.

Лебедка дает возможность зацепиться тросом за верх склона и помогает машине подниматься вдоль него, стабильно держит ее на уклоне, не дает пробуксовывать трансмиссии, позволяет экономить топливо. Длина троса у Ponsse составляет 350 м, у Komatsu на харвестерах – 325 м, на форвардерах – 425 м. Диаметр троса – 14–15 мм. Без лебедки машину оптимально эксплуатировать на уклонах до 25°. В случае оснащения гусеницами она может работать и на уклонах до 30°, но при этом начинают проворачиваться гусеницы, трансмиссия испытывает повышенную нагрузку, что приводит к увеличению расхода топлива, износа гусениц и колес, а также к существенному снижению производительности. При работе на склонах по сравнению с работой на равнине возрастает расход топлива. При использовании лебедки повышение расхода топлива значительно меньше, чем без нее.

Лебедка существенно помогает и при работе машин на склонах в зимний период, когда из-за снега и наледи склон становится еще и скользким.

Установка лебедки и другого дополнительного оборудования достаточно существенно удорожает и утяжеляет базовую машину, делает ее узкоспециализированной, и увеличивает срок получения машины с завода. Решить эту проблему позволяет инновационное решение от компании Ecoforst, которая создала концептуально новую модель самоходной лебедки для лесных машин T-Winch.

По функциональности технология T-Winch в значительной мере превосходит другие технические решения, существующие в настоящее время для заготовки леса на склонах. Благодаря своим габаритам T-Winch без труда доставляется к месту проведения работ автомобилем с повышенной проходимостью. Неоспоримым преимуществом является и то, что лебедки T-Winch способны работать с любой лесозаготовительной техникой без ее специальной подготовки для работы на склонах. Поэтому лесозаготовительные компании, в парке которых есть лесные машины (любой конструкции) без лебедок, успешно работают на склонах при помощи T-Winch.

Лебедки не имеют кабин и управляются по радиоканалу. Для работы лебедок отдельный оператор не нужен: оператор лесной машины сам определяет тяговое усилие и управляет T-Winch из кабины.

*Объектом* исследования являются почвогрунты лесов на склонах. Используются справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Применялись методы аппроксимации численных данных.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Оптимизация параметров процесса деформирования почвогрунта при статических и динамических нагрузках на него лесной машины или трелевочной системы направлена на минимизацию негативных последствий разрушения почвы в пределах заданных границ волока (трассы движения машины), сохранение корневой системы близко расположенного подроста, оставляемых на доращивание деревьев.

Однако в процессе перемещения лесной машины, например при трелевке, трактор многократно изменяет направление движения и совершает поворотные маневры. Это обуславливает формирование дополнительных

касательных напряжений в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки.

Если трелевка осуществляется на склонах с углом наклона направления движения к линии горизонта  $\beta$ , то объемное напряженно-деформированное состояние краевой части массива в пределах глубины  $h$  будет трансформироваться в зависимости от углового параметра  $\beta$ . При этом надо учитывать расположение границы твердого основания мощностью  $H$ , ориентированной к линии горизонта в общем случае под углом  $\gamma \neq \beta$ , и тот факт, что в пределах зоны размером  $H-h$  осуществляется сжатие и деформирование массива почвогрунта.

Результаты математического моделирования и исследований отмеченных процессов при условии  $\gamma = \beta = 0$  (глубина зоны деформации  $H-h$  не зависит от угловых параметров) подробно изложены в работах [6, 9, 13, 14, 16, 17 и др.].

Воспользуемся установленным [13] соотношением для определения нормальной нагрузки (среднего давления)  $q$  при деформировании слоя грунта размером  $h$ :

$$q = \frac{E H k(r, h)}{k_\phi R} \left( \frac{1}{\operatorname{arctg} H/R} - \frac{1-h/H}{\operatorname{arctg} \frac{H-h}{R}} \right), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль деформации;  $k(r, h)$  – безразмерная функция, учитывающая снижение напряжений на глубине зоны деформаций  $h$  по мере удаления расчетной точки от границы волокна на величину  $r$ ,  $k(r, h) = 1,0461 - 0,9145r/h$ ;  $k_\phi$  – коэффициент, отражающий увеличение общей деформации грунта при погружении ядра уплотнения,  $k_\phi = \operatorname{tg}^{-5/3} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$ ;  $\phi$  – угол внутреннего трения;  $R$  – параметр

штампа, определяемый через величины  $a$  и  $D$ ,  $R = aD$ ;  $a = 1 + \frac{b}{H}$ ;  $D$  – диаметр круга, равный площади  $F$  грунтозацепа;  $b$  – ширина штампа.

Массив грунта мощностью  $H-h$ , т. е. за пределами сжатия слоя  $h$ , находится в объемном напряженном состоянии. Пусть лесная машина или трелевочная система весом  $Q_b$  оказывает вертикальное давление на почвогрунт. Точку приложения силы тяжести  $Q_b$  примем за начало системы координат, ось ординат  $y$  направим вдоль плоскости склона, ось абсцисс  $x$  – перпендикулярно оси  $y$ , а ось аппликат  $z$  – в глубь массива перпендикулярно плоскости склона.

Тогда (рис. 3) сила  $Q = Q_b \cos \beta$  действует в направлении оси  $z$ , процесс деформирования почвогрунта под действием этой силы происходит в пространственной декартовой системе координат  $xuz$ , оси которой принимаются главными, а на элементарных площадках массива действуют соответствующие главные напряжения  $\sigma_1 = \sigma_z$ ;  $\sigma_2 = \sigma_y$ ;  $\sigma_3 = \sigma_x$ , тогда как касательные напряжения отсутствуют.

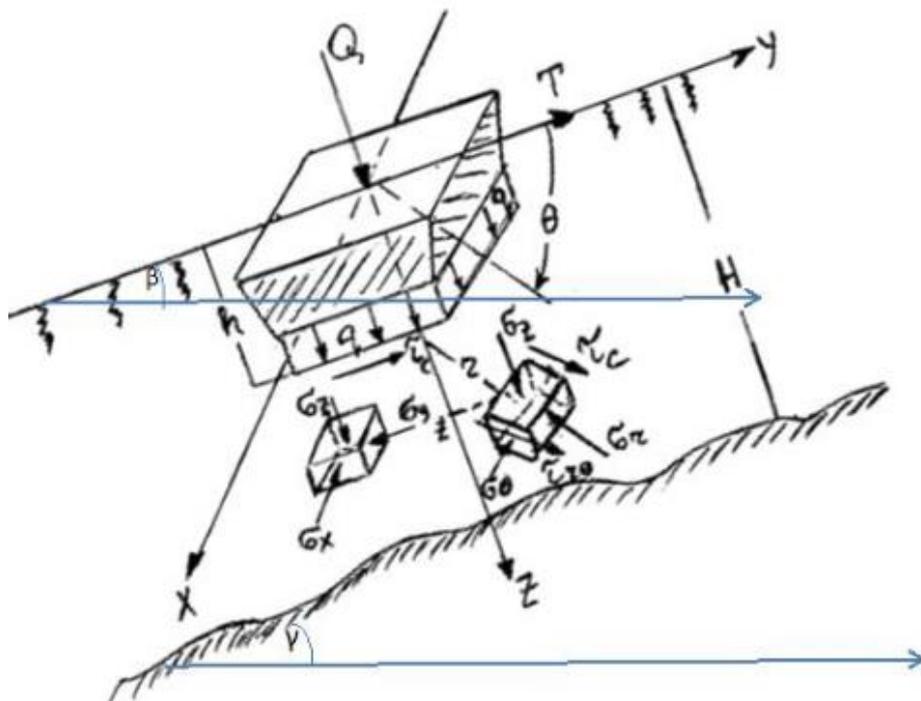


Рис. 3. Схема деформирования краевой части массива почвогрунта  
Fig. 3. Scheme of deformation of the soil array edge part

К штампу кроме силы  $Q$  приложена касательная сила  $T$  тяги трактора, вследствие чего почвогрунт деформируется в направлении действия этой силы. В итоге в плоскости склона вдоль оси  $y$  действует нагрузка  $\tau_c$  удельного сопротивления почвогрунта срезу, связанная с нагрузкой  $q$  посредством силы сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  уравнением обобщенного закона Кулона.

В момент маневра трактора и его отклонения от заданного направления движения на угол  $\theta$  деформирование почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат  $zr\theta$ . Компоненты тензора напряжений в этой системе в общем случае при наличии касательных напряжений  $\tau_{r\theta}$ , совпадающих по направлению с действием нагрузки  $\tau_c$ , определяются соотношениями:

$$\sigma_z = \sigma_1; \quad \sigma_r = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta;$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta.$$

Из данных соотношений следует, что при  $\theta = 0$  компоненты тензора напряжений являются главными, т. е.:

$$\sigma_z = \sigma_1; \quad \sigma_r = \sigma_2; \quad \sigma_\theta = \sigma_3; \quad \tau_{r\theta} = 0.$$

Эти напряжения будут определяться соотношениями:

$$\sigma_z = -\frac{3Q}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2}; \quad (2, a)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\}; \quad (2, б)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[ -\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right\}, \quad (2, в)$$

где  $\nu$  – коэффициент бокового расширения (коэффициент Пуассона).

На рис. 3 при  $\beta = 10^\circ$  представлены зависимости  $\sigma_z(z)$  при трех значениях компоненты  $r$ : 0,05; 0,1; 0,2 м. Исходные данные расчетов:  $Q_b = 150$  кН.

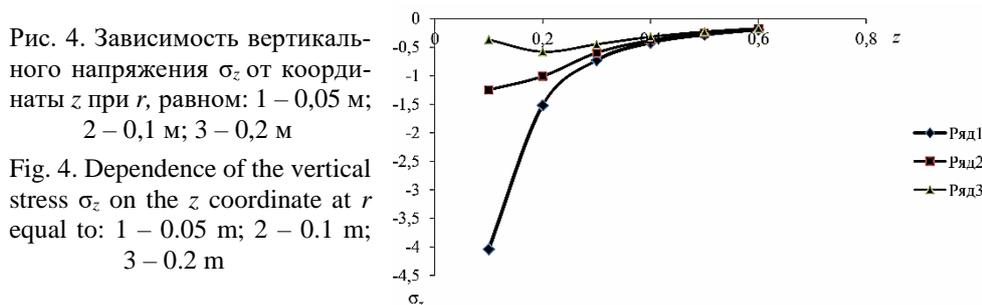


Рис. 4. Зависимость вертикального напряжения  $\sigma_z$  от координаты  $z$  при  $r$ , равном: 1 – 0,05 м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,2 м

Fig. 4. Dependence of the vertical stress  $\sigma_z$  on the  $z$  coordinate at  $r$  equal to: 1 – 0.05 m; 2 – 0.1 m; 3 – 0.2 m

Графические данные рис. 4 показывают, что с удалением от точки приложения нагрузки в плоскости склона, т. е. с ростом  $r$ , напряжения в ряде случаев кратно снижаются. Необходимо при этом отметить, что при  $r \rightarrow 0$ , т. е. в рамках рассмотрения одномерной модели процесса деформирования почвогрунта в непосредственной близости от штампа, снижение вертикальных напряжений  $\sigma_z$  подчиняется степенному закону и, как следует из уравнения (2, а), происходит пропорционально величине  $\frac{1}{z^2}$ .

Зафиксируем координату  $r = 0,1$  м и примем максимальное значение компоненты  $\sigma_z$  на поверхности склона за 1. Угловой параметр  $\beta$  изменяем в пределах от 0 до  $30^\circ$ . Исследуем совместное влияние  $\beta$  и координаты  $z$  на характер снижения относительных напряжений  $\bar{\sigma}_z$  (рис. 5).

На рис. 5 отражено изменение  $z$  от 0,1 до 0,6 м (ось абсцисс),  $\beta$  от 0 до  $30^\circ$  (ось ординат). Относительные напряжения отложены на оси аппликат.

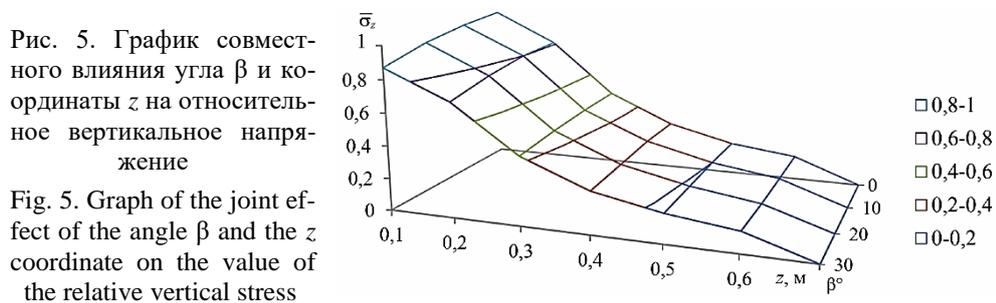


Рис. 5. График совместного влияния угла  $\beta$  и координаты  $z$  на относительное вертикальное напряжение

Fig. 5. Graph of the joint effect of the angle  $\beta$  and the  $z$  coordinate on the value of the relative vertical stress

Анализ данных рис. 5 свидетельствует о том, что изменение  $z$  в заданных пределах обуславливает снижение относительных напряжений в 5–6 и более раз, тогда как изменение угла  $\beta$  – не более чем на 16 %.

Из соотношений (2, б) и (2, в) при  $z = 0$  (поверхность склона) следует, что при совершении маневра лесной машиной или трелевочной системой на угол  $\theta$  одно из трех максимальных касательных напряжений можно выразить как:

$$\sigma_{\max} = 0,5(\sigma_r - \sigma_\theta) = Q(1 - 2\nu) / \{2\pi r^2 \cos\theta\}.$$

На рис. 6 представлены результаты расчетов влияния параметров отклонения трактора от направления движения  $r$ , м, и угла поворота  $\theta^\circ$  на  $\sigma_{\max}$ , МПа.

Так, при  $r = 0,05$  м увеличение угла  $\theta$  от 0 до  $30^\circ$  приводит к росту  $\sigma_{\max}$  на 15–16 %, тогда как при  $r = 0,6$  м – к росту уже на 33–34 %. Этот результат позволяет заключить, что, несмотря на существенно меньшие абсолютные значения  $\sigma_{\max}$ , в более удаленных от направления трассы участках почвогрунта влияние маневра трактора превосходит его влияние на участках в непосредственной близости от места приложения нагрузки. При достижении  $r$  значений 0,15–0,2 м  $\sigma_{\max}$  кратно уменьшается по сравнению с максимальными значениями.

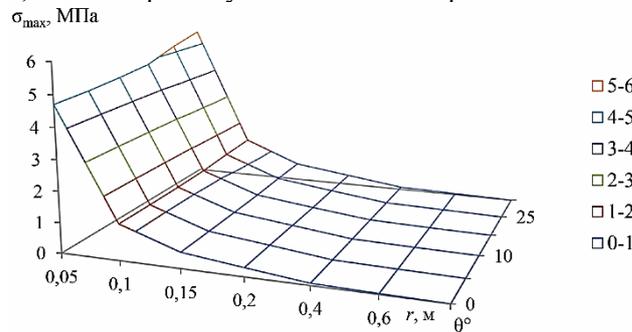


Рис. 6. Зависимость максимального касательного напряжения  $\sigma_{\max}$  от координаты  $r$  и угла поворота трактора  $\theta$

Fig. 6. Dependence of the maximum shear stress  $\sigma_{\max}$  on the  $r$  coordinate and the tractor rotation angle  $\theta$

Связь  $\sigma_z$  с нормальной нагрузкой  $q$ , согласно [6], описывается с помощью зависимости

$$\sigma_z = \frac{q}{1 + (z/aD)^2}. \quad (3)$$

Как следует из (3), при  $z = 0$   $\sigma_z = q$ .

Для определения нагрузки  $q$  можно использовать соотношение (1), в котором геометрические параметры  $h$  и  $H$  необходимо скорректировать путем умножения на коэффициент  $K_\Delta = \cos\Delta$ , где  $\Delta = \beta - \gamma$ . В силу четности функции косинуса знак углового приращения  $\Delta$  не имеет значения. Нагрузка  $q$  рассчитана при следующих исходных данных:  $Q_B = 150$  кН;  $F = 0,24$  м<sup>2</sup>;  $H = 0,5$  м;  $b = 0,4$  м;  $E = 400$  кПа;  $a = 1,8$  м;  $D = 0,28$  м. Угловые параметры  $\beta$  и  $\gamma$  изменялись от 0 до  $30^\circ$ .

Радиальную компоненту  $\sigma_r$ , исходя из моделей деформации грунта с внутренним трением [14–17], можно связать с вертикальной компонентой  $\sigma_z$  соотношением

$$\sigma_r = \alpha; \quad \sigma_z = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_z, \quad (4)$$

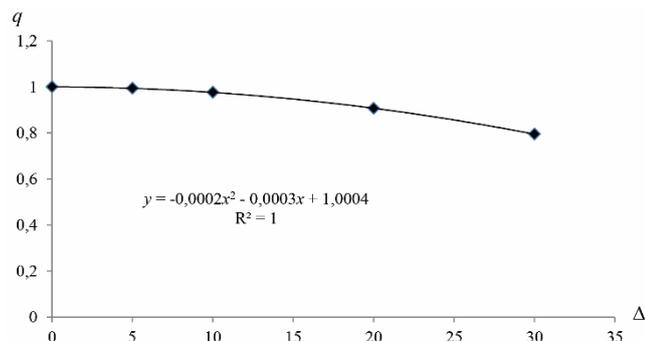
где  $\alpha$  – коэффициент бокового распора.

Для дальнейшего использования соотношений (3) и (4) была проведена оценка зависимости вертикальной нагрузки  $q$  от размера деформируемого слоя  $h$ . Показано, что  $q(h)$  хорошо описывается логарифмическими, т. е. асимптотическими зависимостями, причем при значениях  $h < 0,15$  м влияние соотношения угловых параметров не является существенным. По мере приближения  $h$  к 0,3 м отличие значения  $q$  от исходного достигает 20–25 %, т. е. учитывать

угловые параметры поверхности склона и границы твердого основания необходимо. Этот вывод иллюстрируется при представлении значений  $q$  в относительном виде (рис. 7).

Рис. 7. Влияние углового параметра  $\Delta$  на относительную вертикальную нагрузку

Fig. 7. Effect of the angular parameter  $\Delta$  on the value of the relative vertical load



Если максимальное значение  $q$  принять за 1, то график безразмерной функции  $q$  от  $\Delta$  при фиксированном значении  $h = 0,15$  м показывает, что до уровня  $\Delta = 10\text{--}15^\circ$  влияние угловых параметров на нагрузку незначительно. При больших угловых отклонениях  $q$  снижается до 20 %.

Основываясь на соотношениях (3) и (4), считая в качестве критерия разрушения массива почвогрунта предельное состояние, при котором одно из трех максимальных сдвиговых напряжений  $\sigma_{\max} = 0,5(\sigma_z - \sigma_r)$  превышает предел прочности почвогрунта на сдвиг  $\sigma_{\text{сд}}$ , установим предельную вертикальную координату  $z$  – глубину зоны разрушения, которую можно принять в качестве глубины  $h_k$  образованной колеи:

$$h_k = R \sqrt{\frac{q(1-2\nu)}{2\sigma_{\text{сд}}(1-\nu)} - 1}. \quad (5)$$

На рис. 8 представлена зависимость  $h_k$ , м, от  $q$ , кПа, при двух значениях углового соотношения:  $\Delta = 20^\circ$  (кривая 1) и  $0^\circ$  (кривая 2).

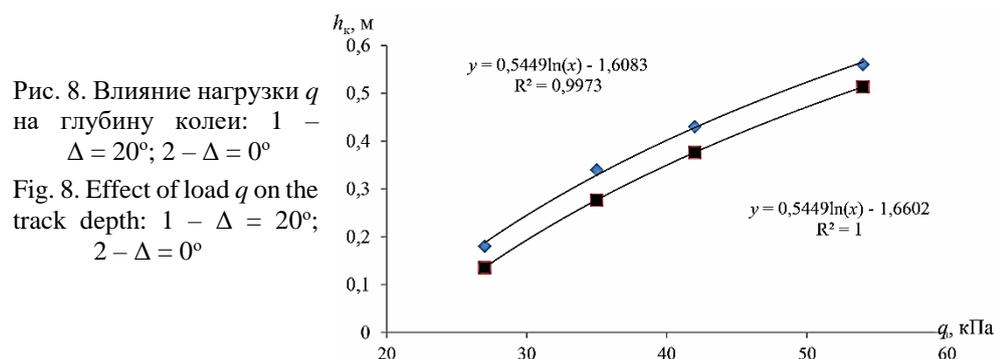


Рис. 8. Влияние нагрузки  $q$  на глубину колеи: 1 –  $\Delta = 20^\circ$ ; 2 –  $\Delta = 0^\circ$

Fig. 8. Effect of load  $q$  on the track depth: 1 –  $\Delta = 20^\circ$ ; 2 –  $\Delta = 0^\circ$

Как видим, кривые на рис. 8 являются эквидистантными и удаленными друг от друга на постоянную величину, равную 0,05 м.

Анализ графика на рис. 8 и зависимость  $h_k \sim \sqrt{q}$  в соответствии с формулой (5) показывают, что при предельном 20 %-м снижении вертикальной нагрузки  $q$  относительное уменьшение глубины колеи не превышает 10 %.

Вместе с тем не учитывать даже этот результат в сложных климатических условиях межсезонных работ неверно.

### Заключение

На крутых склонах современные харвестеры и форвардеры фирмы Ponsse могут эффективно работать и при углах  $\beta$ , достигающих  $41^\circ$ , но при условии оснащения лебедкой типа Synchronwinch. Без лебедки условия работы ограничены углом в  $30^\circ$ .

Для таких крутых склонов была произведена оценка снижения вертикальной нагрузки  $q$ , которая достигает 52–55 %, на грунт. Расчеты показали, что максимально возможное снижение глубины колеи 22–23 %, это является существенным показателем взаимодействия лесной машины или трелевочной системы с почвогрунтом при условии его устойчивости в экстремальных условиях разработки лесосеки.

Таким образом, исследования позволяют сделать вывод о том, что при проведении лесосечных работ на склонах, в первую очередь крутых с углами наклона, превышающими  $20\text{--}25^\circ$ , необходимо корректировать определение предельной нагрузки трелевочной системы на почвогрунт и прогноз глубины образованной в процессе их взаимодействия колеи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В. Перспективность внедрения и эксплуатации современных аэростатных систем трелевки // Наука – Хабаровскому краю: материалы 8-го краевого конкурса-конф. молодых ученых и аспирантов (секция техн. наук). Хабаровск: ТОГУ, 2006. С. 144–154. Abuzov A.V. Prospects for the Introduction and Operation of Modern Balloon Skidding Systems. *Science to Khabarovsk Krai: Proceedings of the 8th Regional Competition-Conference of Young Scientists and Postgraduate Students (Section of Engineering Sciences)*. Khabarovsk, PNU Publ., 2006, pp. 144–154.
2. Абузов А.В. Альтернативные транспортные системы как направление рационального лесозаготовительного процесса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Вологда: ВоГТУ, 2012. С. 60–63. Abuzov A.V. Alternative Transport Systems as a Direction of Rational Logging Process. *Current Issues of the Forest Complex Development*. Vologda, VSTU Publ., 2012, pp. 60–63.
3. Абузов А.В. Основные технологические направления по освоению горных лесов Дальневосточного региона // Вестн. ТОГУ. 2013. № 3(30). С. 91–100. Abuzov A.V. The Basic Technological Directions on the Development of Mountain Forests of the Far East Region. *Vestnik TOGU [Bulletin of PNU]*, 2013, no. 3(30), pp. 91–100.
4. Абузов А.В., Григорьев И.В. Конструктивные особенности канатных лесотранспортных систем на мягких пневматических опорах // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 86–95. Abuzov A.V., Grigoryev I.V. Design Features of Cable Forestry Systems on Soft Pneumatic Supports. *Lesotekhnicheskiy zhurnal [Forestry Engineering Journal]*, 2020, vol. 10, no. 1(37), pp. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/9>
5. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 199 с. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Balloon Transport for Mountain Logging in the Far East*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 199 p.
6. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 183 с. Ageykin A.S. *All-Terrain Wheeled and Combined Propulsors*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1972. 183 p.

7. Адамов Д.В., Любавский Н.А., Галактионов О.Н., Кузнецов А.В. К вопросу моделирования и оценки взаимодействия траков съёмных гусениц противоскольжения с грунтом // *Международ. журн. приклад. и фундам. исследований*. 2018. № 1. С. 11–15. Adamov D.V., Lyubavskiy N.A., Galaktionov O.N., Kuznetsov A.V. Simulation and Evaluation of Interaction of the Anti-Sliding Removable with Ground. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2018, no. 1, pp. 11–15.

8. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И., Щербаков И.П. Основные особенности растительного покрова Якутской АССР. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 156 с. Andreyev V.N., Galaktionova T.F., Perfil'yeva V.I., Shcherbakov I.P. *Main Features of Vegetation Cover of the Yakut ASSR*. Yakutsk, YaF SO AN SSSR Publ., 1987. 156 p.

9. Анисимов Г.М., Большаков Б.М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: ЛТА, 1998. 106 с. Anisimov G.M., Bol'shakov B.M. *Fundamentals of Minimizing Soil Compaction by Skidding Systems*. Saint Petersburg, LTA Publ., 1998. 106 p.

10. Галактионов О.Н. Методика расчета площади пятна контакта шины лесозаготовительной машины // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3, № 4-1(15-1). С. 24–27. Galaktionov O.N. Methods of Determining the Area of the Tire Contact Patch Logging Machines. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2015, vol. 3, no. 4-1(15-1), pp. 24–27. DOI: <https://doi.org/10.12737/13878>

11. Карпачев С.П., Шевелев И.Л., Щербаков Е.Н. Технология механизированных лесозаготовок на крутых склонах // *Лесопромышленник*. 2012. № 4(64). С. 26–29. Karpachev S.P., Shevelev I.L., Shcherbakov E.N. Technology of Mechanized Logging on Steep Slopes. *Lesopromyshlennik* [The Timber Industry Worker], 2012, no. 4(64), pp. 26–29.

12. Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Абузов А.В. Анализ состояния и перспектив развития лесопромышленного комплекса Дальневосточного федерального округа. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 207 с. Ryabukhin P.B., Kazakov N.V., Abuzov A.V. *Analysis of the State and Prospects for the Timber Industry Complex Development of the Far Eastern Federal District*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 207 p.

13. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // *Актуальные проблемы современной науки*. 2006. № 3(29). С. 301–309. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Zhukova A.I. Features of Soil Dynamic Compaction under Its Cyclic Loading. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki*, 2006, no. 3(29), pp. 301–309.

14. Шапиро В.Я., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2018. № 1. С. 61–69. Shapiro V.Ya., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V., Grigor'ev M.F. Theoretical Study of the Soil Mass Destruction Process by Spherical Knives when Using Combined Forest Fire-Fighting Soil-Thrower Constructions. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 1, pp. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.61>

15. Contreras M.A., Parrott D.L., Chung W. Designing Skid-Trail Networks to Reduce Skidding Costs and Soil Disturbance for Ground-Based Timber Harvesting Operations. *Forest Science*, 2016, vol. 62, iss. 1, pp. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.5849/forsci.14-146>

16. Di Gironimo G., Balsamo A., Esposito G., Lanzotti A., Melemez K., Spinelli R. Simulation of Forest Harvesting Alternative Processes and Concept Design of an Innovative Skidding Winch Focused on Productivity Improvement. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2015, vol. 39, pp. 350–359. DOI: <https://doi.org/10.3906/tar-1408-64>

17. d'Oliveira M.V.N. Artificial Regeneration in Gaps and Skidding Trails after Mechanized Forest Exploitation in Acre, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 127, iss. 1-3, pp. 67–76. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00117-6)
18. Gilanipoor N., Najafi A., Heshmat Alvaezin S.M. Productivity and Cost of Farm Tractor Skidding. *Journal of Forest Science*, 2012, vol. 58, no. 1, pp. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.17221/4804-JFS>
19. Glazar K., Maciejewska M. Ecological Aspects of Wood Harvesting and Skidding in Pine Stands with Use Different Technologies. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 2009, vol. 8, pp. 5–14.
20. Jourgholami M. Effects of Soil Compaction on Growth Variables in Cappadocian Maple (*Acer cappadocicum*) Seedlings. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, pp. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0491-7>
21. Kremers J., Boosten M. *Soil Compaction and Deformation in Forest Exploitation*. Wageningen, Netherlands, Stichting Probos, 2018. 53 p.
22. Rudov S., Grigorev I., Kunickaya O., Ivanov N., Kremleva L., Myuller O., Hertz E., Chemshikova Yu., Teterleva E., Knyazev A. Method of Variational Calculation of Influence of the Propulsion Plants of Forestry Machines upon the Frozen and Thawing Soil Grounds. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2019, vol. 28, no. 9, pp. 179–197.
23. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunickaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific Features of Influence of Propulsion Plants of the Wheel-Tyre Tractors upon the Cryomorphic Soils, Soils, and Soil Grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, iss. 1, pp. 2052–2071.

УДК 621.7-114

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149

## ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И ТРИБОСИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ХАРВЕСТЕРОВ

*Е.А. Памфилов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>*

*В.В. Капустин<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>*

*Г.А. Пилюшина<sup>1</sup>, д-р техн. наук; ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>*

*Е.В. Шевелева<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [H-2080-2019](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1763-6932>*

<sup>1</sup>Брянский государственный технический университет, б-р 50-летия Октября, д. 7, г. Брянск, Россия, 241035; e-mail: epamfilov@yandex.ru, vovakapustin1990@mail.ru, gal-pi2009@yandex.ru

<sup>2</sup>Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Дмитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: elshev78@yandex.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 12.10.20 / Принята к печати 28.12.20

---

**Аннотация.** Конкурентоспособность предприятий лесного комплекса во многом обусловлена уровнем использования надежной и высокопроизводительной техники, позволяющей достичь существенного повышения эффективности заготовки и переработки древесины. При этом требуемый уровень надежности лесозаготовительных машин в значительной степени определяется работоспособностью их функциональных узлов, осуществляющих выполнение основных технологических операций. Соответственно, при создании перспективных образцов указанной техники важной является разработка и реализация путей и способов повышения работоспособности функциональных узлов машин. Для этого необходим анализ перспектив и технических возможностей совершенствования основных механизмов и узлов лесозаготовительных машин, лимитирующих их работоспособность факторов. В целях повышения работоспособности функциональных узлов машин требуется согласованное обеспечение благоприятных уровней значительного числа конструкторско-технологических параметров. В частности, целесообразны оптимизация характера относительного перемещения поверхностей деталей и снижение действующих на них нагрузок. Это связано с тем, что указанные факторы определяют износостойкость и сопротивляемость трению, а также тепловой режим работы машины, напряженное состояние функциональных поверхностных слоев и прочность неподвижных соединений. При этом следует принимать во внимание влияние условий эксплуатации, интенсивность изнашивания и срок службы исследуемых объектов. Такой подход обусловлен тем, что триботехнические узлы лесозаготовительных машин выполняют свои функции при действии высоких ударных, циклических и вибрационных нагрузок в широком диапазоне жестких природно-климатических условий, отличающихся низкими температурами, повышенной влажностью, действием химических и абразивных сред. Все это должно учитываться в процессе поиска эффективных путей повышения работоспособности функциональных узлов, в т. ч. и манипуляторов лесозаготовительных машин, достигаться за счет регламентируемого направленного управления свойствами поверхностных слоев при проектировании и изготовлении фрикционно-контактирующих деталей. Обоснована необходимость созда-

---

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

ния научно-инженерных основ повышения работоспособности функциональных узлов и рабочих органов машин, а также достижения при этом требуемой производительности, долговечности и безотказности техники. Уточняются задачи дальнейших исследований, направленных на получение информации, отсутствие которой делает невозможным создание отечественной импортозамещающей техники.

*Для цитирования:* Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Шевелева Е.В. Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 135–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149

*Ключевые слова:* работоспособность, триботехнические узлы, динамические нагрузки, изнашивание, лесозаготовительные машины, шарниры, манипулятор.

## IMPROVING THE PERFORMANCE OF WORKING BODIES AND TRIBOSYSTEMS OF HARVESTER TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

*Evgeny A. Pamfilov*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>

*Vladimir V. Kapustin*<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>

*Galina A. Pilyushina*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering; ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>

*Elena V. Sheveleva*<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2080-2019](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1763-6932>

<sup>1</sup>Bryansk State Technical University, b-r 50-letiya Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation; e-mail: epamfilov@yandex.ru, vovakapustin1990@mail.ru, gal-pi2009@yandex.ru

<sup>2</sup>Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: elshev78@yandex.ru

---

Original article / Received on October 12, 2020 / Accepted on December 28, 2020

---

**Abstract.** Ensuring the competitiveness of enterprises of the forest complex is largely due to the level of reliable and high-performance equipment use, since this achieves a significant increase in the efficiency of timber harvesting and processing. At the same time, the required level of reliability of logging machines is largely determined by the performance of their functional units that carry out the basic technological operations. Accordingly, the development and implementation of ways and methods to improve the performance of functional units of machines is important when creating promising models of the specified equipment. This requires an analysis of the prospects and technical possibilities for improving the main mechanisms and units of logging machines and the factors limiting their performance. In order to improve the performance of machine functional units, it is essential to ensure the coordinated provision of favorable levels of a significant number of design and technological parameters. In particular, it is advisable to optimize the nature of the relative movement of the friction-contacting surfaces of the parts and reduce the loads acting on them. This is due to the fact that these factors determine the wear resistance and friction resistance, as well as the thermal mode of the machine operation, the stress state of the functional surface layers and the strength of the fixed joints. At the same time, the influence of operating conditions, the wear intensity and service life of the objects under study should be taken into account. This

---

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

approach is due to the fact that tribotechnical units of logging machines perform their functions under the action of high shock, cyclic and vibration loads, in a wide range of harsh natural and climatic conditions characterized by low temperatures, high humidity, and the action of chemical and abrasive media. All this should be considered when justifying effective ways to improve the performance of functional units, including manipulators of logging machines, and achieved through regulated directional control of the properties of surface layers in the design and manufacture of friction-contacting parts. The paper substantiates the need to create scientific and engineering foundations for improving the performance of functional units and working bodies of machines, as well as achieving the required performance, durability and reliability. For this purpose, the tasks of further research aimed at obtaining information, the absence of which makes it impossible to create domestic import-substituting equipment, are clarified.

**For citation:** Pamfilov E.A., Kapustin V.V., Pilyushina G.A., Sheveleva E.V. Improving the Performance of Working Bodies and Tribosystems of Harvester Technological Equipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 135–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149

*Keywords:* working capacity, tribotechnical units, dynamic loads, wear, logging machines, swivel joint, manipulator.

### *Введение*

В современных условиях развития лесного комплекса России эффективное решение многих его проблем невозможно без использования отечественной конкурентоспособной лесозаготовительной техники. Отсутствие ее производства в РФ ставит под вопрос обеспечение национальной безопасности страны, поскольку на российском рынке доминируют зарубежные компании, на долю которых приходится большая часть используемой техники для сортиментной заготовки древесины. При этом необходимо иметь в виду, что объем рынка таких машин в России в 2019–2020 гг. составил 330–420 форвардеров, 165–300 харвестеров, 30–40 валочно-пакетирующих машин и примерно столько же скиддеров. Таким образом, наша лесозаготовительная промышленность находится практически в полной зависимости от зарубежных производителей [2, 17, 25, 31, 38, 46–50, 52]. В их руках и сервисное обслуживание поставляемой техники, исключительно прибыльный бизнес, способствующий значительному оттоку средств из нашей страны. Поэтому естественным является отсутствие у зарубежных производителей заинтересованности в открытии производственных площадок или совместных производств лесозаготовительных машин. Данная ситуация привела к тому, что на российском рынке нет сильных отечественных производителей, готовых участвовать в процессах импортозамещения [12, 16, 17, 33].

В последнее время место такого производителя в России начинает занимать белорусский холдинг «Амкодор» [28, 43], что, однако, вряд ли политически и экономически целесообразно: в любом случае нужно иметь отечественного производителя лесозаготовительной техники [16, 18, 29].

Для этого необходимо располагать разработанными в России перспективными конструкциями машин для заготовки и переработки древесины, позволяющими обеспечить существенное увеличение производительности техники и качества получаемой продукции. Важным аспектом при этом является до-

стижение в ближайшее время повышенной надежности и работоспособности триботехнических узлов лесозаготовительных машин и оборудования.

Возможность реализации такого подхода обусловлена появлением реальной перспективы привлечения к производству указанной техники предприятий военно-промышленного комплекса в связи с их ожидаемой конверсией. Такие предприятия обладают требуемой высокотехнологичной базой, кадрами и опытом создания современной сложной техники.

Однако для успешного решения данной задачи помимо производственной базы необходимо располагать соответствующими научно-инженерными разработками, не имея которых невозможно обеспечить создание техники, востребованной как на отечественном, так и на зарубежном рынках. Поэтому требуется выполнение этих разработок, прежде всего в области повышения работоспособности основных узлов и рабочих органов рассматриваемых машин и обеспечение за счет этого их высокой производительности, долговечности и безотказности.

Цель работы – выработка путей повышения работоспособности рабочих органов и деталей трибосистем многооперационных лесозаготовительных машин за счет совершенствования технологий упрочняющей обработки и более эффективного конструктивного исполнения ответственных узлов.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектами исследований являются ответственные узлы лесозаготовительных машин и их рабочие органы, работоспособность которых недостаточна по причине несовершенства конструкций и технологии изготовления, вследствие чего они не могут быть использованы в полной мере при создании отечественных конкурентоспособных образцов современной лесозаготовительной техники. К таким узлам относится, прежде всего, главный рабочий орган лесозаготовительных машин – манипулятор с захватно-срезающим устройством. С помощью манипулятора выполняется широкий перечень технологических операций, начиная с валки древесины и заканчивая погрузкой полученных сортиментов. Сюда же входят устройства гидропривода, содержащие трубопроводы и их многочисленные соединения [2].

В процессе работы отдельные технологические элементы рассматриваемой машины и ее рабочие органы выполняют согласованные движения друг относительно друга. В частности, стрела и рукоять совершают относительный поворот с использованием шарнирных соединений. Поворотный ротатор, закрепленный на конце рукояти, через скобу наклонного устройства обеспечивает перемещение головки из вертикального в горизонтальное положение. Привод всех механизмов манипуляторов гидравлический. Эти перемещения приводят к интенсивному изнашиванию поверхностей подвижных деталей, составляющих манипулятор.

Харвестерная головка также содержит большое количество взаимно подвижных деталей. Прежде всего, это захватные рычаги, на концах которых смонтированы гидравлические моторы, приводящие во вращение подающие валцы протаскивающего механизма. В процессе работы они прижимаются к дереву и удерживают его в силовом контуре при выполнении технологических опера-

ций. Головка оснащена подвижными и неподвижными сучкорезными ножами. Боковые подвижные ножи имеют индивидуальный привод от гидроцилиндров. На нижней части рамы размещается срезающее устройство – пильный механизм, предназначенный для валки и раскряжевки дерева на сортименты после обрезки сучьев [32].

Как видно, в конструкции лесозаготовительных машин преобладают функциональные узлы, относящиеся к триботехническим, поскольку в них реализуются процессы трения, а наиболее частыми причинами отказов являются достижение недопустимых величин износа, а также потеря герметичности гидравлических соединений, затупление сучкорезных ножей, пильных цепей, шарнирных соединений и т. д. Работоспособность этих узлов в значительной степени определяет технический уровень машины [19, 21, 34, 35, 39, 44].

Совокупности функциональных узлов, причины их отказов и перечень параметров, определяющих работоспособность, отражены на схеме, представленной на рисунке. Разнообразие видов и механизмов изнашивания деталей рассматриваемых узлов машин предопределяет сложность выбора методик их изучения. Перспективные методы и техника для выполнения экспериментальных исследований рассматриваются в литературно-патентных источниках [5, 7–9, 11, 13–15, 36, 40, 41, 47, 51, 53]. Многое из предложенного авторами данных работ может быть успешно использовано при разработке путей повышения триботехнических характеристик выбранных объектов исследования. Однако в ряде случаев могут потребоваться и новые методические разработки, например в части более широкого использования компьютерного моделирования [7–9].



Основные триботехнические узлы и рабочие органы лесозаготовительных машин

Basic tribotechnical units and working bodies of logging machines

Выполненными ранее исследованиями [21, 26, 27, 34, 35] установлено, что рассматриваемые триботехнические узлы и составляющие их детали эксплуатируются в условиях приложения высоких ударных, циклических и вибрационных нагрузок в жестких природно-производственных условиях, таких как сложный рельеф местности, неудовлетворительное состояние грунтов, климатические условия, включающие широкий температурный диапазон, вплоть до  $-40^{\circ}$ , повышенную влажность и т. д.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Преобладающие механизмы изнашивания деталей основных триботехнических узлов лесозаготовительных машин, характерные условия его протекания, а также факторы, способствующие интенсификации поверхностного разрушения, приведены в таблице.

| №* | Наименование функционального узла      | Характерные эксплуатационные условия, определяющие работоспособность                                       | Прогнозируемые преобладающие механизмы изнашивания                   | Воздействие, усугубляющее процессы изнашивания  |
|----|--|--|--|---|
| 1  | Шарнирные соединения                   | Динамическое нагружение; высокие пиковые давления; граничная смазка [35]                                   | Адгезионно-механическое изнашивание, схватывание [39]                | Поверхностное деформирование; высокая локальная температура   |
| 2  | Разъемные соединения гидросистемы      | Вибрации, циклические контактные давления [24]   | Фреттинг-коррозия [42]   | Пластическое деформирование; потеря герметичности   |
| 3  | Исполнительные устройства гидропривода | Динамическое нагружение; абразивное действие; граничная смазка; кавитация [44]                             | Усталостное адгезионно-механическое и кавитационное изнашивание [44] | Микрорезание абразивными частицами; повышенная температура, пенообразование рабочей жидкости [40, 41] |
| 4  | Протаскивающие вальцовые механизмы     | Циклические и ударные нагрузки; действие химически активных сред и абразива [19, 22]                       | Коррозионно-механическое и абразивное изнашивание [20]               | Изменение геометрии шипов; выкрашивание и сколы [22]  |
| 5  | Сучкорезные ножи                       | Многоосное напряжение; ударные нагрузки; действие химически активных сред, абразива и микроорганизмов [32] | Коррозионно-механическое и абразивное изнашивание [34]               | Антиплоская деформация режущего лезвия; электрохимическое воздействие; микровыкрашивание              |
| 6  | Пильный аппарат                        | Ударные и вибрационные нагрузки; действие химически активных сред, абразива и микроорганизмов              | Усталостное, коррозионно-механическое и абразивное изнашивание [21]  | Выкрашивание, сколы; растяжение пильных цепей; недостаток смазки [21]                                 |

\* № соответствует номеру на схеме.

С точки зрения оценки условий нагружения подвижных соединений шарнирных узлов манипуляторов можно отметить, что наиболее тяжелым является момент, когда манипулятор начинает технологические перемещения. В это время он воспринимает максимальную нагрузку, при действии которой контактирующие поверхности должны преодолевать трение покоя, по величине гораздо большее, чем трение движения. Такая ситуация усугубляется и тем, что и условия смазывания в это время наиболее неблагоприятные. Это способствует схватыванию. В результате отделяются достаточно крупные продукты изнашивания, и становится возможным объемное разрушение деталей трибоузлов [3, 35, 39].

Характер нагружения других фрикционных соединений и его величина определяются режимами эксплуатации: массой заготавливаемых деревьев, скоростью технологических перемещений, силами трения и инерции. При этом повышенные нагрузки реализуются при выполнении наиболее энергоемких операций, занимающих 30...40 % времени работы машин. Такими операциями являются наведение рабочего органа на дерево, его срезание и перенос, а также погрузка лесоматериалов. Кроме того, значительные нагрузки возникают при пуске или торможении манипулятора, они сопровождаются быстрым изменением сил, действующих на рабочий орган при освобождении его от обрабатываемого дерева.

Существенную роль в протекании изнашивания, помимо высокого уровня динамического нагружения рассматриваемых деталей, играют и другие негативные факторы, такие как попадание абразива в зону фрикционного взаимодействия, химическое действие активных сред и т. д. Совокупности таких условий отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах материалов деталей триботехнических узлов и применяемых рабочих сред – гидравлических жидкостей и смазок [4, 30, 36, 40, 41].

Необходимо также иметь в виду, что при низких температурах повышается вязкость смазок, снижаются их смазочные свойства, а это негативно влияет на процессы трения и изнашивания деталей триботехнических узлов. Поэтому при выработке путей повышения износостойкости одновременно должны оптимизироваться и применяемые при работе смазочно-технологические материалы, а также способы их подачи в зоны технологических воздействий [3, 6, 10, 23, 30]. Кроме того, необходимо принимать во внимание вероятность существенного охрупчивания применяемых конструкционных материалов трущихся пар деталей при действии низких температур. Следствием становится снижение ударной вязкости, что также интенсифицирует процесс изнашивания контактных поверхностей деталей рассматриваемых узлов, особенно при действии ударно-динамических нагрузок. Для минимизации трения перспективно использование антифрикционных покрытий и твердых смазок, обеспечивающих хороший смазочный эффект и стабильно низкий коэффициент трения. Для шарнирных соединений целесообразно применение поляризованного графита и дисульфида молибдена [6, 10, 23].

В летний период смазочный материал нагревается, его функциональные свойства, включая вязкость, снижаются. В результате происходит вытекание смазки из зоны трения, что также отрицательно сказывается на процессах трения, смазки и охлаждения в триботехнических соединениях. Кроме того, коле-

бание эксплуатационных температур приводит к температурным деформациям деталей и изменению характера их функционального соединения. Вследствие этого из-за уменьшения рабочих зазоров возрастает вероятность схватывания между контактирующими деталями. Появляются микроочаги сваривания сопрягаемых поверхностей, что приводит к интенсификации изнашивания и преждевременному отказу трибосопряжений. При колебаниях величин зазоров также нарушается процесс образования эффективно работающего масляного клина. При этом абразивные частицы, попадая в зазоры триботехнических соединений, деформируют и царапают функциональные поверхности контактирующих деталей, приводя к повышенному износу [36, 40, 41].

Нередкой является и работа триботехнических узлов в условиях большой запыленности, загрязненности, наличия активных сред и повышенной влажности. Существенное негативное влияние на узлы трения машин оказывают особые условия изнашивания их деталей при технологическом контактировании с обрабатываемой древесиной и продуктами ее деструкции. Это способствует активизации коррозионно-механического и водородного изнашивания [20, 37, 45, 47, 51, 53].

Отмеченные условия эксплуатации практически в полной мере воспринимаются и триботехническими узлами рассматриваемых машин, в т. ч. деталями шарнирных соединений. Они в процессе эксплуатации работают в режиме реверсивного возвратно-вращательного движения. Такой характер движения способствует росту износа, повышая его в 2 раза и более по сравнению с трением при одностороннем вращении [35]. Это связано с быстрой переменной направления скоростей перемещения и изменением величины и знака сдвиговых деформаций и действующих напряжений. Вследствие этого сила трения увеличивается в широких пределах, проявляется наклеп и перестраиваются дислокационные поля в поверхностных микрообъемах материала. Возрастает дефектность структуры используемых материалов, увеличивается свободная поверхностная энергия, а также интенсифицируются электрофизические и химические процессы на поверхностях трения и в контактной зоне.

Перспективным для повышения работоспособности шарнирных соединений является замена возвратно-вращательного трения односторонним. Это может быть достигнуто за счет использования храповых или иных механизмов формирования трения [35].

В шарнирных соединениях манипуляторов фрикционно-контактирующие поверхности деталей работают преимущественно в условиях граничной смазки. Изредка проявляется полусухое трение, особенно в начале перемещения нагруженного манипулятора, и редко формируется достаточно устойчивый масляный клин. Эксплуатация подшипников скольжения при полусухом трении и даже при граничной смазке приводит к значительному износу поверхностей, а повышенные величины износа способствуют нарушению кинематической точности конструкции. Это вызывает дополнительные динамические нагрузки, удары, вибрации и, как следствие, зачастую становится основной причиной разрушения деталей шарнирных соединений. Для стабилизации трения в данных условиях целесообразно введение в зону трения твердосмазочных материалов или использование для изготовления подшипников скольжения композитов, имеющих такие материалы в своей структуре.

Для снижения динамических нагрузок и вибраций, негативно влияющих на работоспособность манипуляторов, перспективным является применение демпферных устройств, промежуточных демпфирующих материалов, а также материалов с внутрискруктурными виброгасящими составляющими [19, 30, 35]. Кроме того, для повышения триботехнических показателей целесообразно использование регулярного микрорельефа и остаточных напряжений сжатия на функциональных поверхностях подвижных деталей [39, 44]. В неподвижных соединениях шарнирного узла возможно создание промежуточных покрытий, обеспечивающих относительные микроперемещения в стыках.

Вместе с тем имеющейся в настоящее время информации, особенно прикладной направленности, недостаточно для повышения работоспособности и создания перспективных образцов лесозаготовительных машин. Кроме того, сведения либо находятся в конфиденциальных источниках фирм производителей, либо защищены действующими патентами. Это делает необходимым расширение исследований в части выработки новых перспективных путей повышения работоспособности шарнирных соединений манипуляторов, пильных устройств, подвижных деталей и соединительно-герметизирующих устройств гидросистем, вальцов, подающих заготовку в зону обработки, ножей для срезания сучьев и др.

При этом следует принимать во внимание, что при изнашивании подающих вальцов, сучкорезных ножей и пильных цепей происходит деформационное и режущее взаимодействие их рабочих зон непосредственно с заготавливаемой древесиной. Это обуславливает увеличение числа физико-химических факторов, определяемых действием древесного вещества на реализацию механизма изнашивания и его интенсивность. Закономерности такого влияния установлены в работах [21, 22, 34].

Особый характер изнашивания наблюдается при взаимодействии поверхностей деталей триботехнических узлов гидравлических систем машин. К ним прежде всего относятся герметизирующие устройства гидросистем и используемых в них подшипников скольжения [30, 36, 40, 41, 44].

Следует отметить и необходимость существенного расширения исследований в части конструкторско-технологического обеспечения износостойкости деталей узлов рассматриваемых машин. При этом целесообразным является использование результатов ранее выполненных в указанном направлении работ [1, 21, 22, 24, 27, 35, 42]: полученные результаты могут служить в качестве отправных и базовых данных для формирования последующих исследовательских программ в части поиска научно-обоснованных путей повышения эффективности функционирования рассматриваемых объектов. При этом перспективные разработки должны быть ориентированы на гарантированное повышение эксплуатационного ресурса и технико-экономической эффективности работы функциональных узлов машин посредством создания и использования новых конструкционных материалов, совершенствования упрочняющих технологий и глубокой модернизации конструкций ответственных узлов.

### Заключение

В целях эффективного развития российской лесозаготовительной отрасли, снижения ее зависимости от зарубежных производителей техники и действия возможных санкций должны быть созданы научно-технические основы для последующей инженерной разработки отечественных высокотехнологичных лесозаготовительных машин и обеспечения их серийного производства. Для этого необходимы систематизация имеющихся научных данных и выполнение дальнейших исследований в области повышения долговечности триботехнических узлов лесозаготовительных машин по следующим направлениям.

1. Создание конструкций триботехнических узлов с использованием материалов, обладающих повышенными теплопроводностью и теплоемкостью; формирование регулярного микрорельефа на контактирующих поверхностях и остаточных напряжений сжатия в функциональных слоях деталей.

2. Разработка новых антифрикционных материалов, покрытий и промежуточных сред, содержащих антифрикционные составляющие (например, графит, дисульфид молибдена и др.), для снижения коэффициента трения.

3. Использование демпферных устройств и применение подшипниковых материалов с внутрискрутурными виброгасящими составляющими в целях уменьшения уровня динамических нагрузок и вибраций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абразумов В.В.* Износостойкость режущего инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2009. 34 с. *Abrazumov V.V. Wear Resistance of the Cutting Tool When Processing Wood-Based Composite Materials: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 34 p.*

2. *Бартенев И.М., Емтыль З.К., Татаренко А.П., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д.* Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: моногр. М.: Флинта: Наука, 2011. 408 с. *Bartenev I.M., Emtyl' Z.K., Tatarenko A.P., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. Hydromanipulators and Forestry Technological Equipment: Monograph. Moscow, Flinta: Nauka Publ., 2011. 408 p.*

3. *Буяновский И.А.* Граничная смазка // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 170–186. *Buyanovskiy I.A. Boundary Lubrication. Tribology. State and Prospects. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU, 2019. pp. 170–186.*

4. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). М.: МСХА, 2002. 632 с. *Garkunov D.N. Tribotechnics (Design, Manufacture and Operation of Machines). Moscow, MSKhA Publ., 2002. 632 p.*

5. *Гриб В.В., Лазарев Г.Е.* Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1968. 141 с. *Grib V.V., Lazarev G.E. Laboratory Tests of Materials for Friction and Wear. Moscow, Nauka Publ., 1968. 141 p.*

6. *Гришин Н.Н.* Пластичные смазочные материалы (пластичные смазки) // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 335–358. *Grishin N.N. Plastic Lubricants. Tribology. State and Prospects. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 335–358.*

7. *Евельсон Л.И., Памфилов Е.А.* Оптимизация узлов трения машин с учетом неопределенности информации в исходных данных // Трение и износ. 2006. Т. 27, № 2. С. 191–195. *Evelson L.I., Pamfilov E.A. Optimization of Friction Units of Machines*

with Consideration of the Information Uncertainty in Initial Data. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2006, no. 2, pp. 191–195.

8. Евельсон Л.И., Захаров С.М., Памфилов Е.А., Рафаловская М.Я. Компьютерная технология анализа и синтеза узлов трения на основе баз данных и экспертных систем // Трение и износ. 2000. Т. 21, № 4. С. 380–385. Evelson L.I., Zakharov S.M., Pamfilov E.A., Rafalovskaya M.Y. PC-Process of Analyzing and Synthesizing Friction Units Using Databases and Expert Systems. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2000, no. 4, pp. 380–385.

9. Захаров С.М. Компьютерная трибология // Трение и износ. 1993. № 1. С. 98–106. Zaharov S.M. Computer Tribology. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 1993, no. 1, pp. 98–106.

10. Золотов В.А. Присадки (добавки) к смазочным материалам // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 378–389. Zolotov V.A. Improvers (Additives) to Lubricants. *Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 378–389.

11. Карасик И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира / под ред. проф. В.С. Кершенбаума. М.: Центр «Наука и техника», 1993. 325 с. Karasik I.I. *Methods of Tribological Tests in the National Standards of the Countries of the World*. Ed. by Prof. V.S. Kershenbaum. Moscow, Tsentr “Nauka i tekhnika” Publ., 1993. 325 p.

12. Коваленко Н.В., Чекунов А.С. Импортозамещение в отечественном сельхозмашиностроении как фактор повышения конкурентоспособности отрасли // Изв. ДВФУ. Экономика и управление. 2019. № 3. С. 67–88. Kovalenko N.V., Chekunov A.S. Import Substitution in the Domestic Agricultural Machinery as a Factor in Increasing the Competitiveness of the Industry. *Izvestiya Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Ekonomika i upravleniye* [The bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management], 2019, no. 3, pp. 67–88. DOI: <https://doi.org/10.24866/2311-2271/2019-3/67-88>

13. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справ. / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с. Kombalov V.S. *Methods and Tools for Friction and Wear Testing of Structural and Lubricating Materials*: Handbook. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 384 p.

14. Куksenova Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ: справ. изд. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 152 с. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G., Rybakova L.M. *Methods of Testing for Friction and Wear*. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2001. 152 p.

15. Мирошниченко И.П. Перспективные оптические измерительные средства и технологии для контроля качества конструкционных материалов // Качество и жизнь. 2014. № 5. С. 438–446. Miroshnichenko I.P. Perspective Optical Measuring Tools and Technologies for Quality Control of Structural Materials. *Kachestvo i zhizn'* [Quality and life], 2014, no. 5, pp. 438–446.

16. Михайлов А. Лесные тренды. Лесопромышленный комплекс получит новую стратегию развития // Рос. газ. Экономика Северо-Запада. 2020. № 140(8194). Режим доступа: <https://rg.ru/2020/06/30/reg-szfo/lesopromyshlennyj-kompleks-poluchit-novuyu-strategiyu-razvitiia.html> (дата обращения: 30.06.20). Mikhaylov A. Forest Trends. The Timber Industry will Receive a New Development Strategy. *Rossiyskaya gazeta. Ekonomika Severo-Zapada*, 2020, no. 140(8194).

17. Национальный каталог техники «Стройдормаш». 2020. Вып. № 29. Режим доступа: [http://www.sdm-katalog.ru/pdf/kat\\_stroydor\\_29\\_2020.pdf](http://www.sdm-katalog.ru/pdf/kat_stroydor_29_2020.pdf) (дата обращения: 08.11.21). *National Catalogue of Equipment “Stroydormash”*. 2020, iss. 29.

18. О возможных направлениях выхода из кризиса в развитии отечественного лесного машиностроения: протокол заседания Комитета при Бюро ЦС по тракторному, сельскохозяйственному, лесозаготовительному, коммунальному и дорожно-строительному машиностроению / Общерос. обществ. организация «Союз машиностроителей России». М., 2014. 12 с. Режим доступа: <http://soyuzmash.ru/docs/prot-ktm-181114.pdf> (дата обращения: 08.11.21). On the Feasible Directions of Overcoming the Crisis in the Development of Russian Forest Mechanical Engineering. *All-Russian Public Organization "Russian Engineering Union". Committee under the Bureau of the Central Council for Tractor, Agricultural, Logging, Communal and Road Construction Mechanical Engineering. Protocol of the Committee Meeting.* Moscow, 2014. 12 p.

19. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А. Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 5. С. 129–141. Pamfilov E.A., Pilyushina G.A. Possibilities and Prospective Ways to Increase Working Capacity of Forest Sector Machines and Equipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 5, pp. 129–141. URL: <http://lesnozhurnal.ru/upload/iblock/716/le1.pdf>

20. Памфилов Е.А., Прозоров Я.С. К вопросу моделирования коррозионно-механического изнашивания // Трение и износ. 2012. Т. 33, № 3. С. 284–297. Pamfilov E.A., Prozorov Y.S. On the Modeling of Mechanochemical Wear. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2012, vol. 33, no. 3, pp. 284–297.

21. Памфилов Е.А., Шевелева Е.В. Особенности исследования изнашивания режущих инструментов для переработки древесных материалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 89–103. Pamfilov E.A., Sheveleva E.V. A Study of Cutter Wear Rate for Wood-Based Materials Processing. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 6, pp. 89–103. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.89>

22. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Шевелева Е.В., Прозоров Я.С., Пыриков П.Г. Повышение работоспособности подающих устройств деревоперерабатывающего оборудования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 102–110. Pamfilov E.A., Pilyushina G.A., Sheveleva E.V., Prozorov Ya.S., Pyrikov P.G. Improving the Feeder's Working Capacity of Timber Processing Equipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 102–110. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.102>

23. Паренаго О.П., Кузьмина Г.Н. Трибоактивные присадки к смазочным материалам // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 390–397. Parenago O.P., Kuz'mina G.N. Triboactive Improvers for Lubricants. *Tribology. State and Prospects.* Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 390–397.

24. Патент 2499171 РФ, МПК F16J 15/00. Способ изготовления неподвижных разъемных соединений: № 2011148194/06: заявл.25.11.2011; опубл. 20.11.2013 / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков П.Г., С.В. Тяпин. Pamfilov E.A., Pilyushina G.A., Pyrikov P.G., Tjapin S.V. *Method to Manufacture Fixed Detachable Joints.* Patent RF no. RU 2499171 C2, 2013.

25. Пискунов М.А. Особенности российского рынка лесозаготовительной техники // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 132–147. Piskunov M.A. Features of the Harvesting and Logging Equipment Market in Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 6, pp. 132–147. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-132-147>

26. Пошарников Ф.В., Усиков А.В. Особенности работы узлов трения в лесопромышленном оборудовании // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение. Воронеж: ВГЛТА, 2009. Вып. 4. С. 95–100. Posharnikov F.V. Features of the Work of Friction Units in Timber-Processing Equipment. *Nature Management: Resources and Technical Support.* Voronezh, VGLTA Publ., 2009, iss. 4, pp. 95–100.

27. Прозоров Я.С. Повышение эффективности производства древесной стружки на основе увеличения долговечности применяемого оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2016. 17 с. Prozorov Ya.S. *Improving the Efficiency of Wood Chip Production Based on Enhancing the Durability of the Equipment Used*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2016. 17 p.

28. Развитие лесного машиностроения в Республике Беларусь и Российской Федерации // Интернет-портал СНГ. Режим доступа: [https://studwood.ru/1002319/tovarovedenie/razvitie\\_lesnogo\\_mashinostroeniya\\_v\\_respublike\\_bielarus\\_i\\_rossiyskoy\\_federatsii](https://studwood.ru/1002319/tovarovedenie/razvitie_lesnogo_mashinostroeniya_v_respublike_bielarus_i_rossiyskoy_federatsii) (дата обращения: 10.08.20). Development of Forestry Machine-Building in the Republic of Belarus and the Russian Federation. *CIS Internet Portal*. Moscow, 2015.

29. Распоряжение Правительства РФ от 20 сент. 2018 г. № 1989-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/551187885> (дата обращения: 10.08.20). *The Decree of the Government of the Russian Federation of September 20, 2018 No. 1989-r "On Approval of the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030"*.

30. Рождественский Ю.В., Задорожная Е.В. Динамически нагруженные подшипники скольжения // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 235–256. Rozhdestvenskiy Yu.V. Dynamically Loaded Sliding Bearings. *Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 235–256.

31. Российский статистический ежегодник. 2019. М.: Росстат, 2019. 708 с. *Russian Statistical Yearbook 2019*. Moscow, Rosstat Publ., 2019. 708 p.

32. Рукмоиных К.П., Ведерников С.В. Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127. Rukmoynikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimiting Knife. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2019, no. 1, pp. 120–127. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.120>

33. Сборник материалов Заседания Комитета при Бюро ЦС по тракторному, сельскохозяйственному, лесозаготовительному, коммунальному и дорожно-строительному машиностроению Союза машиностроителей России. М., 2014. 120 с. Режим доступа: <http://www.soyuzmash.ru/docs/ktm/sm250214.pdf> (дата обращения: 10.08.20). *Proceedings of the Meeting of the Committee under the Bureau of the Central Council for Tractor, Agricultural, Logging, Communal and Road Construction Mechanical Engineering of the Russian Engineering Union*. Moscow, 2014. 120 p.

34. Селиверстов А.А., Симонова И.В., Александров А.А. Исследование состояния геометрии формы и заточки сучкорезных ножей харвестеров // Тр. лесинж. фак. ПетрГУ. 2010. Т. 8. С. 128–132. Seliverstov A.A., Simonova I.V., Aleksandrov A.A. Geometry of Form and Filing Angle of Harvester Head Knives. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU [Resources and Technology]*, 2010, vol. 8, pp. 128–132. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2010.1785>

35. Серебрянский А.И., Афоничев Д.Н., Ворохобин А.В. Повышение износостойкости шарнирных соединений манипуляторов при ремонте // Вестн. ВГАУ. 2012. № 2(33). С. 107–111. Serebryansky A.I., Afonichev D.N., Vorokhobin A.V. Increasing the Wear Resistance of Manipulator Pin Joints during Repairs. *Zhurnal Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Vestnik of Voronezh State Agrarian University]*, 2012, vol. 2(33), pp. 107–111.

36. Современная трибология: итоги и перспективы / Э.Д. Браун и др.; отв. ред. К.В. Фролов. М.: ЛКИ, 2008. 480 с. Braun E.D. et al. *Modern Tribology: Results and Prospects*. Ed. by K.V. Frolov. Moscow, LKI Publ., 2008. 480 p.

37. Сорокин Г.М., Ефремов А.П., Саакян Л.С. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов. М.: Нефть и газ, 2002. 424 с. Sorokin G.M., Efremov A.P., Saakyan L.S. *Corrosion-Mechanical Wear of Steels and Alloys*. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2002. 424 p.

38. Стрельцов Э. Импорт лесозаготовительной техники в Россию // Основные средства. 2011. № 2. С. 80–82. Strel'tsov E.K. Import of Logging Equipment to Russia. *Osnovnyye sredstva*, 2011, no. 2, pp. 80–82.

39. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко А.О., Прокофьев А.Н., Тотай А.В., Федонин О.Н. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 448 с. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko A.O. Prokof'yev A.N., Totay A.V., Fedonin O.N. *Technological Support and Improvement of Operational Properties of Parts and Their Connections*. Ed. by A.G. Suslov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006. 448 p.

40. Трибология: состояние и перспективы / под ред. И.В. Горячевой и М.А. Броновца. Уфа: УГАТУ, 2016. Т. 1. 435 с. *Tribology. State and Prospects*. Ed. by I.V. Goryacheva, M.A. Bronovets. Ufa, USATU Publ., 2016, vol. 1. 435 p.

41. Трибология: Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы / под ред. С.М. Захарова и И.А. Буяновского. Уфа: УГАТУ, 2019. 504 с. *Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ed. by S.M. Zakharov, I.A. Buyanovskiy. Ufa, USATU Publ., 2019. 504 p.

42. Тяпин С.В. Повышение работоспособности неподвижных соединений в гидросистемах деревоперерабатывающего оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 17 с. Tyarin S.V. *Improving the Performance of Fixed Joints in Hydraulic Systems of Wood Processing Equipment*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2012. 17 p.

43. Холдинг «Амкодор» выпустил 800-ю машину для лесопромышленного комплекса // Пресс-релизы ОАО «Амкодор». 25 ноября 2016. Режим доступа: [https://www.tvr.by/news/ekonomika/amkador\\_vypustil\\_800\\_yu\\_mashinu\\_lesopromyshlennogo\\_kompleksa/](https://www.tvr.by/news/ekonomika/amkador_vypustil_800_yu_mashinu_lesopromyshlennogo_kompleksa/) (дата обращения: 10.08.20). Amkodor Holding Released the 800th Machine for the Timber Industry. *Press Releases of JSC "Amkodor"*. November 25, 2016.

44. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. et al. *Fundamentals of Tribology (Friction, Wear, and Lubrication)*. Ed. by A.V. Chichinadze. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 664 p.

45. Darmawan W., Rahayu I.S., Tanaka C., Marchal R. Chemical and Mechanical Wearing of High Speed Steel and Tungsten Carbide Tools by Tropical Woods. *Journal of Tropical Forest Science*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 255–260.

46. *Global Forest Products. Facts and Figures 2016*. Rome, FAO, 2017. 18 p. Available at: [www.fao.org/3/i7034EN/i7034en.pdf](http://www.fao.org/3/i7034EN/i7034en.pdf) (accessed 10.08.20).

47. Jellesen M.S. *Tribocorrosion Properties of Metallic Materials and Effects of Metal Release*. Ph.D. Thesis. Lyngby, Denmark, DTU, 2007. 74 p.

48. Johnsen T. Finnish Forest Machine Market 2017 Compared to the Swedish. *Materials of the Website Forestry.com*. 2018. Available at: <https://www.forestry.com/editorial/finnish-forest-machine-market/> (accessed 10.08.20).

49. Johnsen T. Strong Forwarder Market in Sweden 2017. *Materials of the Website Forestry.com*. 2018. Available at: <https://www.forestry.com/editorial/strong-forwarder-market-sweden-2017/> (accessed 10.08.20).

50. Kairo I. John Deere Forestryn tilauskirja täyttyy venäläisillä tilauksilla [John Deere Forestry Oy Doubled Exports of Logging Equipment to Russia]. *Suomalais-Venäläinen kauppakamari (SVKK)* [Finnish-Russian Chamber of Commerce (FRTP)]. 2017. Available at: <https://www.svkk.fi/uutishuone/john-deere-forestry-tilauskirja-taytty-venalaisilla-tilauksilla/> (accessed 10.08.20).

51. Mischler S. Triboelectrochemical Techniques and Interpretation Methods in Tribocorrosion: A Comparative Evaluation. *Tribology International*, 2008, vol. 41, iss. 7, pp. 573–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.11.003>

52. *Ponsse Plc Annual Report for 2019*. 2019. 124 p. Available at: <https://pim.ponsse.com/media/ponsse-pim-api/api/content/getfile/16231567.pdf> (accessed 10.08.20).

53. *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*. Ed. by D. Landolt, S. Mischler. Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2011. 576 p.



УДК 630\*6

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-150-159

**INTERRELATIONS OF WOOD PHYSICAL AND MECHANICAL  
PROPERTIES AND PATTERNS OF THEIR CHANGE  
WITHIN THE BIRCH STEM***Vladimir I. Fedyukov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABC-7222-2021](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4146-463X>**Vasilii Yu. Chernov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [X-4439-2019](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>**Maria S. Chernova, Postgraduate Student; ResearcherID: [X-4073-2019](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0192-5158>**Olga V. Tsoy, External PhD Student; ResearcherID: [ABC-7278-2021](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8028-2201>*

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: [fiv48@mail.ru](mailto:fiv48@mail.ru), [chernovvy@volgatech.net](mailto:chernovvy@volgatech.net)

---

**Original article** / Received on October 21, 2020 / Accepted on December 25, 2020

---

**Abstract.** The physical and mechanical properties of standing wood are not constant along the tree height and diameter. They also differ depending on the tree species and conditions of its growth. So, the research purpose is to identify patterns of change and interrelations between the parameters of density, compressive strength and sound propagation velocity along the wood fibers inside the stem of a birch tree growing in the forests of the Middle Volga region of Russia, where such research had never been conducted before. The work was carried out on two sampling areas laid out by standard methods in birch forests of natural origin with average productive capacity on the territory of the Scientific-Experimental Forest District of the Volga State University of Technology in the Mari El Republic. The average age of the birch trees is about 70 yrs, breast height diameter is 30 cm, and height is 28.5 m; 14 sample trees were studied; 0.5 m long chucks were cut out from their stems at a height of 1.3 m from the butt end and at relative heights of 0.25H, 0.5H, and 0.75H. Experimental work was carried out in a laboratory environment with modern technical facilities using standard procedures. Mathematical models describing the changes in the parameters stated above and the interrelations between them with regard to the stem diameter at relative heights were obtained. The research results generally confirmed the findings of other researchers on densitograms and other physical and mechanical properties of wood within the tree stem. However, the features listed above were revealed for birch trees growing under such conditions; in particular, it concerns the ratio of strength and density, as well as the wood strength and the velocity of sound propagation through the fibers. The results obtained have both scientific and practical value as a basis for the development of a non-destructive method for predicting technical properties of standing wood as well as timber for producing assortments for special purposes.

**For citation:** Fedyukov V.I., Chernov V.Yu., Chernova M.S., Tsoy O.V. Interrelations of Wood Physical and Mechanical Properties and Patterns of Their Change within the Birch Stem. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 150–159. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-150-159

**Funding:** The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No. 075-15-2021-674) and the Core Facility Centre “Ecology, Biotechnology, and Processes for Producing Environmentally Friendly Energy Carriers” of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

**Keywords:** birch wood, wood density, compressive strength along the grain, sound velocity, interrelation of physical and mechanical parameters.

## ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРИ СТВОЛА БЕРЕЗЫ

**В.И. Федюков**, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [ABC-7222-2021](https://orcid.org/0000-0003-4146-463X),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4146-463X>

**В.Ю. Чернов**, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

**М.С. Чернова**, аспирант; *ResearcherID*: [X-4073-2019](https://orcid.org/0000-0002-0192-5158),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0192-5158>

**О.В. Цой**, соискатель; *ResearcherID*: [ABC-7278-2021](https://orcid.org/0000-0001-8028-2201),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8028-2201>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,  
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: [fiv48@mail.ru](mailto:fiv48@mail.ru)

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 21.10.20 / Принята к печати 25.12.20

---

**Аннотация.** Физико-механические свойства древесины у растущих деревьев варьируют по высоте и диаметру дерева, а также различаются в зависимости от породы дерева и условий его произрастания. Целью исследования было выявление закономерностей изменения плотности, прочности на сжатие и скорости распространения звука вдоль волокон древесины и взаимосвязей между этими признаками внутри ствола березы, произрастающей в лесах Среднего Поволжья России, где подобные исследования раньше не проводились. Работа выполнена на двух пробных площадях, заложенных стандартными методами в березовых лесах естественного происхождения со средней продуктивностью на территории учебно-опытного лесхоза Поволжского государственного технологического университета в Республике Марий Эл. Средний возраст берез – около 70 лет, диаметр – 30 см, высота – 28,5 м. Отобрано 14 модельных деревьев. Из их стволов на высоте 1,3 м от торца и на относительных высотах 0,25Н; 0,5Н; 0,75Н вырезаны чураки длиной по 0,5 м. Экспериментальные работы проведены в лабораторных условиях с помощью современных технических средств при использовании стандартных процедур. Получены математические модели, характеризующие изменения изучаемых параметров и взаимосвязи между ними с учетом диаметра ствола на относительных высотах. Результаты подтвердили выводы исследователей о характере денситограмм и других физико-механических свойствах древесины внутри ствола дерева. Однако для березы, произрастающей в описанных выше условиях, выявлены особенности соотношения прочности и плотности, а также прочности древесины и скорости распространения звука по волокнам. Полученные данные имеют научную и практическую ценность как основа для разработки неразрушающего метода прогнозирования технических свойств древесины на корню, а также древесины для получения сортиментов специального назначения.

**Для цитирования:** Fedyukov V.I., Chernov V.Yu., Chernova M.S., Tsoy O.V. Interrelations of Wood Physical and Mechanical Properties and Patterns of Their Change within the Birch Stem // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 150–159. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-150-159

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2021-674) и ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета в г. Йошкар-Ола.

**Ключевые слова:** древесина березы, плотность древесины, прочность на сжатие вдоль волокон, скорость звука, взаимосвязь физико-механических показателей.

### *Introduction*

Physical and mechanical properties of wood are known to vary greatly not only depending on the species but also within the stem diameter and height of the same tree. In woodworking technology for achieving the maximum yield of high-quality products made of a volume unit of raw materials its proper rough cutting plays an important role; with regard to the technical properties of wood in different parts of the stem. As for the birch timber, this applies first to the manufacture of special types of products, such as stocks for certain types of weapons, hunting skis, sports equipment, individual parts of musical instruments, frame structures, special veneer for interior covering of aircraft and submarines, etc. Special purpose timber with certain requirements to density, durability, and acoustics is harvested in order to produce all mentioned above.

The birch is the most common deciduous species in Russian forests. In the State Forest Fund the share of birch forests in terms of the timber stock is approximately 78 % among small-leaved deciduous species. Moreover, two species, namely, silver birch (*Betula pendula* Roth) and downy birch (*Betula pubescens* Ehrh) dominate by area and standing timber [4].

Despite the remarkable predominance of birch, so far the greatest number of studies with respect to forest site conditions of Russia are devoted to the study of other wood species: spruce and pine [5, 10, 11], to a lesser extent aspen, oak and maple [6, 15, 21, 22], and only a few works devoted to birch are found [3, 4, 12, 13]. Recently there have appeared academic papers devoted to changes in the properties of birch wood due to its modification [11, 20].

It is important to emphasize that in current conditions, foreign scientists and specialists began to actively study the wood of this species in different regions of the world. Along with traditional physical tests, they carry out more in-depth scientific studies of its properties, such as non-destructive methods and computer tomography.

### *Research objects and methods*

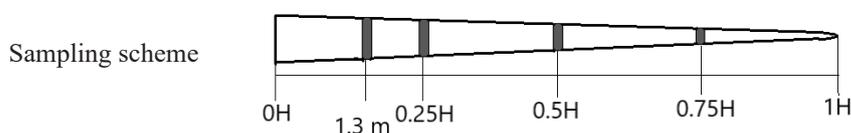
Birch stands of natural (seed) origin were employed as an object of the research on the territory of the Scientific-Experimental Forest District of the Volga State University of Technology (VSUT). Sample plots are represented by birch and linden stands of the 11th quality class typical for the Middle Volga region. The stand

inventory indices are as follows: the average age of birch trees is 70 yrs; their breast height diameter (DBH) is approximately 30 cm; and the height is 28.5 m.

Two sampling areas were laid out in these stands according to the state standard GOST 16483.0–80 “Wood. General Requirements for Physical and Mechanical Tests”.

Before felling, the DBH of each model tree was measured in two mutually perpendicular directions within the accuracy of 0.5 cm and a notch was made on the north side of each tree.

Then the total length, the distance from the butt end to the first visible dead knot and to the live crown, as well as the stem diameter at relative heights of 0.25H, 0.5H, and 0.75H were measured for each felled model tree. At each of these heights and at 1.3 m height 0.5 m long chucks were cut out from the tree length stem (fig.).



The chucks were divided in half into so-called “north” and “south” parts. Standard samples from each of them were made in the form of 20×20×30 mm rectangular strips at a distance of 0.25R, 0.5R and 0.75R from the pith. These samples were originally used for acoustic tests, and after they were carried out, 20×20×30 mm rectangular prisms were cut out at both ends of the strips for determining wood density and compressive strength.

The test samples were kept for 60 days prior to testing in the laboratory for drying under natural conditions to room-dry humidity ( $W = 8 \pm 2\%$ ).

*Determination of wood density.* During the study of the physical properties of the birch wood its basic density ( $\rho_{\text{bas}}$ , kg/m<sup>3</sup>) was determined by the ratio of its oven-dry sample weight ( $m_0$ , kg) to its maximum volume ( $V_{\text{max}}$ , m<sup>3</sup>) at humidity equal to or above the fiber saturation point according to the following equation:

$$\rho_{\text{bas}} = m_0 / V_{\text{max}}$$

The sample basic density was determined by the method of the buoyancy force of the sample immersed in a fluid [17].

The average density of the stem cross section ( $\rho_{\text{cs}}$ ) was determined by the method of prof. O.I. Poluboyarinov [17] as a weighted average between the densities  $\rho_{0.25R}$ ,  $\rho_{0.5R}$ , and  $\rho_{0.75R}$ .

Assuming the basal area to be 100 %, the average cross section density will be calculated by the following equation:

$$\rho_{\text{cs}} = \frac{\rho_{0.25R} \cdot 7 + \rho_{0.5R} \cdot 29 + \rho_{0.75R} \cdot 64}{100},$$

where  $\rho_{0.25R}$ ,  $\rho_{0.5R}$ , and  $\rho_{0.75R}$  – wood densities at 0.25R, 0.5R, and 0.75R distance from the stem center, respectively, kg/m<sup>3</sup>; 7, 29, and 64 – area occupied by wood ring sections, %.

Average stem basic density was determined as the weighted average of the densities of the individual parts (chucks) along its height by the following equation:

$$\rho_{\text{tree}} = \frac{\rho_{1.3\text{m}}V_{1.3\text{m}} + \rho_{0.25\text{H}}V_{0.25\text{H}} + \rho_{0.5\text{H}}V_{0.5\text{H}} + \rho_{0.75\text{H}}V_{0.75\text{H}}}{V_{1.3\text{m}} + V_{0.25\text{H}} + V_{0.5\text{H}} + V_{0.75\text{H}}},$$

where  $\rho_{1.3\text{m}}$ ,  $\rho_{0.25\text{H}}$ ,  $\rho_{0.5\text{H}}$ , and  $\rho_{0.75\text{H}}$  – stem (chuck) cross section densities at heights of 1.3 m, 0.25H, 0.5H, and 0.75H, respectively, kg/m<sup>3</sup>;  $V_{1.3\text{m}}$ ,  $V_{0.25\text{H}}$ ,  $V_{0.5\text{H}}$ , and  $V_{0.75\text{H}}$  – volumes of individual sections along the tree height at heights of 1.3 m, 0.25H, 0.5H, and 0.75H, respectively, m<sup>3</sup>.

*Determination of wood compressive strength along the grain.* The studies were carried out in accordance with the state standard GOST 16483.10 “Wood. Methods for Determination of Ultimate Strength in Compression Parallel the Grain”. The same samples were taken for this purpose, using which the basic density of wood was determined earlier.

Wood compressive strength along the grain ( $\sigma_w$ , MPa) was determined according to the standard equation:

$$\sigma_w = P_{\text{max}}/ab,$$

where  $P_{\text{max}}$  – maximum load, N;  $a$  and  $b$  – dimensions of a sample cross section, mm.

Determination of the wood compressive strength was carried out with the universal testing machine AG-50 kNIC allowing receiving simultaneously real-time readings of the maximum load  $P_{\text{max}}$ , graphic image of the wood destruction process and the final values of  $\sigma_w$ .

*Determination of the sound velocity in wood.* Acoustic properties of the birch wood along with its strength are considered in manufacturing the mechanical parts of musical instruments, antiresonance veneer for covering internal walls of submarines and in soundproof structures of individual buildings. The material used for this purpose should have a lower sound velocity.

The simplest and most available method for determining sound velocity ( $C$ ) in wood is the ultrasonic pulse velocity (UPV) method, and the calculations are carried out according to the following equation:

$$C = l/\tau,$$

where  $l$  – length of a sample, m;  $\tau$  – time of longitudinal elastic wave propagation, s.

Determination of the sound propagation velocity along the fibers was carried out on the standard samples in the form of rectangular strips of 20×20×300 mm using the ultrasonic pulse detector UK-14P. In order to achieve better contact of the device with the test sample a rubber sheet (adhesive tape) was glued to the surface of piezoelectric detectors, and measurements were carried out at a frequency of 60 kHz.

It is important to mention that ultrasonic devices have found wide application in the selection of resonant coniferous timber [5]. Until now no research has been done on the development of non-destructive acoustic diagnostic methods of physical and mechanical properties of deciduous wood, especially of standing birch. This work is aimed to some extent at solving this important practical issue.

### Results and discussion

*Wood density.* The wood density distribution by height and radius zones is shown in table 1, while table 2 shows the results of statistical processing of the obtained data.

Table 1

**Changing the basic density of birch wood by height and stem radius**

| Section height in shares of the stem height | Basic density by the stem cross sections, kg/m <sup>3</sup> |      |       | Average density of the stem cross section, kg/m <sup>3</sup> |
|---|---|------|-------|--|
|   | 0.25R   | 0.5R | 0.75R |  |
| 1.3m  | 483   | 509  | 543   | 512  |
| 0.25H                                       | 479   | 502  | 521   | 501  |
| 0.5H  | 474   | 508  | 517   | 495  |
| 0.75H                                       | 461   | 484  | 507   | 482  |

Note: The average density of the stem section is obtained as the average of cross section zones.

Table 2

**The main statistical indicators of the average basic density by the birch stem sections**

| Section height in shares of the stem height | Values of statistical indicators |             |      |         |      |
|---|----------------------------------|-------------|------|---------|------|
|   | $\bar{M}$                        | $\pm\sigma$ | V, % | $\pm m$ | P, % |
| 1.3m  | 512                              | 39.74       | 7.76 | 8.67    | 1.69 |
| 0.25H                                       | 501                              | 32.23       | 6.44 | 7.03    | 1.40 |
| 0.5H  | 495                              | 28.15       | 5.69 | 6.63    | 1.34 |
| 0.75H                                       | 482                              | 28.11       | 5.83 | 6.45    | 1.34 |

As can be seen from tables 1 and 2, a decrease in the birch wood density by tree height is proved statistically; similar character variability of this physical parameter is consistent with previous results obtained in other regions [3, 12, 17]. In this regard a recent work of foreign scientists [7] is of particular interest. It shows lower height dependence of birch wood density compared to spruce and pine, which is associated with peculiar tree crown structure of different species. The birch is a light demanding species, so it has a relatively rapid clearing of stem from limbs, and, as a consequence, a stem with a highly raised crown is formed. The annual rings formed in the tree butt are known for the high content of late wood; as a result, the wood density here is relatively high.

Deeper anatomical studies [16] confirm the reduction in wood density along the birch stem by the increase of vascular area and the content of parenchyma in the cells of the tree top end.

In the horizontal plane the wood density increases from the center to the peripheral zone. A detailed analysis shown in table 3 proves that density reduction in the direction from the peripheral zone to the heartwood is approximately 9.5 %, and from the stem butt to the top it is 5.9 %. Technically, e.g. when cutting tree length stems to assortments, the density change by height in the range of 6 % is not significant. The density dynamics in the horizontal planes of the stem cross section has greater practical importance, because it determines a significant difference in the specific yield of high-quality assortments, as well as dry matter from the stem heartwood and peripheral zones.

The studies confirmed close relationship between wood density  $\rho_{tree}$  and average density of the cross section at height of 1.3 m ( $\rho_{1.3m}$ ) by the following equation:

$$\rho_{tree} = 178.52 + 0.641\rho_{1.3m}, r = 0.922, \quad (1)$$

where  $r$  – correlation coefficient.

For the birch wood, the relationship is also found between the average density of a tree and the density of the peripheral zone of the stem  $\rho_{0.75R}$  at height of 1.3 m by the following equation:

$$\rho_{cs} = 67.3 + 0.853\rho_{0.75R}, \quad r = 0.982. \quad (2)$$

Using equation (1), it is possible to calculate the density of the entire birch stem based on the wood density parameter at the height of 1.3 m of the felled tree. However, equation (2) is of greater practical importance, since it makes possible to determine the physical parameter mentioned above even without felling the tree. It is sufficient to extract a transverse-radial core from the peripheral part of the stem of about 0.75R at the height of 1.3 m with a hollow drill and determine the basic density of this sample.

*Wood compressive strength along the grain.* Table 3 shows the resulting values of the compressive strength along the grain by radius zones (heartwood, center, peripheral) and the stem height (1.3 m, 0.25H, 0.5H, and 0.75H). Such a division is justified by the set aim of identifying the best stem zone for obtaining special purpose assortments with high physical and mechanical properties of wood.

Table 3

**Changing the compressive strength ( $\sigma_w$ , MPa) along the grain of birch wood by stem height and radius zones**

| Section in the stem        | Values of statistical indicators |             |      |         |
|----------------------------|----------------------------------|-------------|------|---------|
|                            | $\bar{M}$                        | $\pm\sigma$ | V, % | $\pm m$ |
| <i>By the stem height</i>  |                                  |             |      |         |
| 1.3m                       | 63.6                             | 9.5         | 14.9 | 2.1     |
| 0.25H                      | 66.0                             | 7.0         | 10.6 | 1.6     |
| 0.5H                       | 64.5                             | 9.3         | 14.4 | 2.2     |
| 0.75H                      | 61.3                             | 8.3         | 13.5 | 1.9     |
| <i>By the radius zones</i> |                                  |             |      |         |
| Heartwood                  | 56.9                             | 7.0         | 12.3 | 1.3     |
| Center                     | 64.5                             | 5.6         | 8.7  | 1.1     |
| Peripheral                 | 71.1                             | 6.9         | 9.7  | 1.4     |

*Note:* Heartwood, center and peripheral zones correspond to the 0.25R, 0.5R, and 0.75R stem sizes.

The test results for the compressive strength along the grain show an increase in strength of birch wood in the transverse direction from the core to the cambium layer and a decrease in longitudinal direction from the butt to the top of the stem. An exception is the value of tensile strength in the cross section at the height of 1.3 m. This is due to the deviation from the straight direction of the fibers, arising from the strong pressure on the wood of the stem lower part of the above-mentioned zones of the growing tree.

It is known that there is a close interrelation between density, strength and hardness of wood [19, 23]. The results obtained show that the interrelation of the birch wood strength in compression along the grain and the density under given forest site conditions is expressed by the following equation:

$$\sigma_w = 0.211\rho_{bas} - 44.44, \quad r = 0.83, \quad (3)$$

where  $\sigma_w$  – birch wood compressive strength along the grain in room conditions ( $W = 8\%$ ), MPa.

Using equation (3), it is possible to predict strength properties of the birch wood according to its basic density without additional mechanical testing. This greatly simplifies and reduces costs when sorting special purpose workpieces with specified material strength requirements.

*Sound velocity in wood.* Average values of sound velocity along the stem height and radius zones are given in table 4.

Table 4 shows that the sound velocity varies by the stem zones similar to the change of the wood compressive strength along the grain: it increases from the center to the periphery zone of the stem and decreases from the stem butt up the stem. An exception is the height of 1.3 m as well as for the compressive strength along the grain. This can also be explained by a change in the straight direction of the fibers in the stem butt.

An equation for the interrelation between wood strength and sound velocity along the fibers has been obtained by correlation analysis:

$$\sigma = 0.0345C - 125.64, \quad r = 0.792, \quad (4)$$

where  $\sigma$  – compressive strength along the grain, MPa.

Table 4

**Changing the sound velocity ( $C$ , m/s) along the fibers of birch wood  
by height and radius zones**

| Section of the stem        | Values of statistical indicators |             |      |         |
|----------------------------|----------------------------------|-------------|------|---------|
|                            | $\bar{M}$                        | $\pm\sigma$ | V, % | $\pm m$ |
| <i>By the stem height</i>  |                                  |             |      |         |
| 1.3m                       | 5453                             | 167         | 3.1  | 36      |
| 0.25H                      | 5576                             | 197         | 3.5  | 43      |
| 0.5H                       | 5535                             | 189         | 3.4  | 45      |
| 0.75H                      | 5388                             | 188         | 3.5  | 42      |
| <i>By the radius zones</i> |                                  |             |      |         |
| Heartwood                  | 5304                             | 136         | 2.6  | 26      |
| Center                     | 5538                             | 145         | 2.6  | 27      |
| Peripheral                 | 5643                             | 129         | 2.3  | 26      |

Scientifically, this interrelation of sound velocity along the fibers and compressive strength in the same direction can be explained by the features of wood structure inside the tree stem. For example, the content of late wood in annual layers decreases from the butt to the top of the tree, and in transverse direction – from the periphery to the heartwood. This has a direct impact on the distribution of density, strength and, consequently, the sound propagation velocity.

It is obvious that such substantiation describes only a general picture of the interrelations between these parameters. Wood is a material of biological origin with a complex structure, e.g. it differs by content of juvenile wood, internal flaws, fibril tilt, etc. Together, they bring their own adjustments to the interrelations of the physical and mechanical parameters of wood, which cannot be identified by traditional physical testing methods.

Although the model trees were without a false core, they definitely had juvenile wood; in the butt part, in addition, trees sometimes have natural fiber deviation from straight direction. Perhaps, together, all these affected the reduction of strength and sound propagation velocity in the wood at the stem height of 1.3 m (tables 3 and 4).

Equation (4) allows implementing the non-destructive quality control method of birch stock dimension with an ultrasonic flaw detector. The compressive strength along the grain is calculated via determining the sound velocity and using this equation. Comparing the obtained results with standard indicators, it is not complicated to make a non-destructive selection of assortments for the intended purpose.

Besides, ultrasonic devices can detect hidden, invisible on the outer surface of the examined material wood defects: internal knots, cracks and other flaws according to the state standard GOST 2140–81 “Visible Defects of Wood. Classification, Terms and Definitions, Methods of Measurement”.

### Conclusion

There are certain patterns in the dynamics of wood physical and mechanical properties within the birch stem. In general, these patterns correlate with the results of other scientists from different regions: wood density decreases with tree height; in the horizontal plane it increases from the center to the peripheral zone; whereas the decrease in density from the peripheral zone of the stem to the core zone is about 9.5 %, and from the butt to the top is 5.9 %.

However, there are specific features in the densitogram and in the interrelation of density, compressive strength and sound velocity along the fibers in these forest site conditions.

The resulting equations of constraints between them make it possible to introduce the non-destructive method for diagnosis of physical and mechanical properties of standing wood. For this purpose, it is only necessary to use a hollow drill to extract a transverse-radial core from the peripheral part of the stem of about 0.75R at the height of 1.3 m and determine one of the parameters of this sample, and subsequently by calculation to determine its value at other relative tree heights – 0.25H; 0.5H; 0.75H.

The same equations of constraints between physical and mechanical properties make it possible to speed up and minimize the cost for wood testing without its felling. For example, by determining the basic density at the height of 1.3 m it is possible to predict the strength parameter of the whole stem by calculation.

The conclusions are substantiated by the results of physical methods of wood testing. The authors plan to carry out more in-depth scientific research using both traditional and modern methods, e.g. computed tomography with subsequent comparative analysis of the results.

### REFERENCES

1. Bello A.A., Jimoh A.A. Some Physical and Mechanical Properties of African Birch (*Anogeissus leiocarpus*) Timber. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2018, vol. 22, iss. 1, pp. 79–84. DOI: <https://doi.org/10.4314/jasem.v22i1.14>
2. Collins S., Fink G. Mechanical Behaviour of Sawn Timber of Silver Birch under Compression Loading. *Wood Material Science & Engineering*, 2020, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1801836>
3. Danilov D.A. *Features of Mixed Stands Formation, Commodity Structure and Wood Density of Pine and Spruce Trees*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2016. 41 p.
4. Denisov S.A. *Birch Forests of the Middle Volga Region: Biology, Ecology and Integrated Economy in Birch Forests of *Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Yoshkar-Ola, 1999. 40 p.

5. Fedyukov V.I. *Resonant Spruce: Selection from Stands, Cultivation, and Intended Use*: Monograph. Yoshkar-Ola, VSUT Publ., 2016. 256 p.
6. Fedyukov V.I., Saldaeva E.Y., Chernova M.S., Chernov V.Y. Research into Dendro-Acoustic Properties of Introduced Clones' Wood as Material for Manufacturing Musical Instruments. *SEEFOR*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 173–179. DOI: <https://doi.org/10.15177/see-for.19-18>
7. Heräjärvi H. Variation of Basic Density and Brinell Hardness within Mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* Stems. *Wood and Fiber Science*, 2004, vol. 36, no. 2, pp. 216–227.
8. Liepiņš K., Rieksts-Riekstiņš J. Stemwood Density of Juvenile Silver Birch trees (*Betula pendula* Roth.) from Plantations on Former Farmlands. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19(2), pp. 179–186.
9. Luostarinen K., Verkasalo E. Birch as Sawn Timber in Mechanical Further Processing in Finland. A Literature Study. *Silva Fennica Monographs 1*, 2000. 40 p.
10. Melekhov I.S. Significance of Forest Types and Forest Site Conditions in the Study of Wood Structure and Its Physical and Mechanical Properties. *Trudy Instituta lesa AN SSSR*, 1949, vol. 1U, pp. 11–21.
11. Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Qualitative Characteristics of Pine Wood on Plantations*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2005. 116 p.
12. Mikheyevskaya M.A. *Production of Pressed Wood with Homogeneous Quality Indicators*: Cand. Eng. Sci. Diss. Voronezh, 2019. 250 p.
13. Musikhina L.A. *Research and Development of Scientific and Methodological Bases of Qualimetry of Wood Raw Materials of the Volga-Vyatka Region*: Cand. Eng. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 2005. 235 p.
14. Pavlovičs G., Dolacis J., Daugaviete M., Hrols J., Alksne A., Cīrulle D. Comparison of the Physical and Mechanical Properties of the Wood of Wild Cherry (*Prunus avium* L.) and Birch (*Betula pendula* Roth.) Grown in Latvia. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 2006, vol. 59, pp. 164–168.
15. Pchelin V.I. *Biological Bases of Cultivation of High-Quality Wood for Target Purpose: Case Study of Spruce and Aspen Forests of the Middle Volga Region*: Dr. Agric. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 1989. 478 p.
16. Platonov A.D., Mikheevskaya M.A., Snegireva S.V., Kuryanova T.K., Kiseleva A.V., Topcheev A.N. The Influence of Vessels Variability on Wood Quality of Birch and Aspen in the Trunk of the Tree. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 212–221. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5b24061a94a5f2.93144911](https://doi.org/10.12737/article_5b24061a94a5f2.93144911)
17. Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 159 p.
18. Pushinskis V., Mionchinskis U., Tuherm H., Hrols J., Dolacis J. Some Physical and Mechanical Properties of Birch (*Betula pendula* Roth.) Wood Growing in Latvia. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 2003, vol. 53, pp. 308–317.
19. Repola J. Models for Vertical Wood Density of Scots Pine, Norway Spruce and Birch Stems, and Their Application to Determine Average Wood Density. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 4, pp. 673–685. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.322>
20. Sheykman D.V., Kosheleva D.V. Study of Physical and Mechanical Properties of Modified Birch and Aspen Wood. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2016, vol. 19, no. 15, pp. 110–112.
21. Shirnin V.K. *Breeding for Wood Quality: Case Study of Common Oak and Other Species in the Central Chernozem Region*: Dr. Agric. Sci. Diss. Voronezh, 1999. 302 p.
22. Vikhrov V.E. *Oak Wood Structure and Properties*. Moscow, AN SSSR Publ., 1954. 263 p.
23. Volynskiy V.N. On the Correlation of Timber Strength and a Number of Its Parameters. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1991, no. 1, pp. 60–64. URL: [http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/706/60\\_64.pdf](http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/706/60_64.pdf)

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

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

УДК 674.06

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-160-172

## РАСКРОЙ КРУГЛЫХ СОРТИМЕНТОВ С ЯДРОВОЙ ГНИЛЬЮ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПИЛОМАТЕРИАЛЫ

*А.С. Торопов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAA-8881-2021](https://orcid.org/0000-0003-4414-2505),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-2505>*

*В.Е. Бызов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABC-4527-2020](https://orcid.org/0000-0002-2078-5226),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2078-5226>*

*Е.В. Торопова<sup>1</sup>, канд. экон. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-1783>*

*А.В. Сергеевичев<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>*

*Е.В. Сазанова<sup>4</sup>, канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: [G-8650-2019](https://orcid.org/0000-0001-5731-7517),*

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

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: Toropov\_A\_S@mail.ru, ef@volgatech.net

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; e-mail: marana@inbox.ru

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: 910sav@gmail.com

<sup>4</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: e.sazanova@narfu.ru

---

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 29.12.20 / Принята к печати 23.03.21

---

**Аннотация.** Пиломатериалы хвойных пород широко применяются при изготовлении несущих строительных конструкций. Однако в последнее время качество круглых лесоматериалов для изготовления пиломатериалов ухудшается. Средний диаметр круглых лесоматериалов, поступающих на лесопильные предприятия, постоянно уменьшается, а в круглых лесоматериалах больших диаметров часто встречается ядровая гниль. Это вызвано тем, что все большее количество хвойных деревьев в лесу поражается ядровой сердцевинной гнилью. Причина – ухудшение экологической обстановки, вызванное загрязнением окружающей среды. Удаление гнили, как правило, происходит на этапе отбора круглых лесоматериалов, поэтому при проведении заготовки большая часть древесины с ядровой гнилью продолжает оставаться в лесу, захламывая территорию и заражая здоровую древесину. При этом вместе с древесиной, пораженной гнилью, удаляется и здоровая заболонная часть, обладающая высокими прочностными показателями. Предложен способ переработки круглых лесоматериалов с ядровой гнилью на элементы несущих строительных конструкций. Разработана технологическая схема изготовления из таких лесоматериалов двутавровых балок для малоэтажного домостроения. В результате раскроя круглых лесоматериалов и удаления путем фрезерования ядровой гнили получают уголкового элемента. При помощи специальных приспособлений производят их сушку в зажатом состоянии, затем склейку между собой для получения балок с поперечным сечением в виде двутавра. Выбран комплект оборудования для переработки круглых лесоматериалов с ядровой гнилью. Рассчитаны затраты на организацию производства. Эффективность технологического проекта оценена с применением метода дисконтированных денежных потоков по показателям: чистая приведенная стоимость, индекс доходности и дисконтированный срок окупаемости. Результаты подтверждают эффективность организации производства несущих строительных конструкций из кру-

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

глых лесоматериалов, пораженных ядровой гнилью. Переработка древесины, которая остается в лесу, на элементы строительных конструкций не только увеличивает ресурсы древесины для строительства, но и создает условия для улучшения экологической обстановки в лесных массивах.

**Для цитирования:** Торопов А.С., Бызов В.Е., Торопова Е.В., Сергеевичев А.В., Сазанова Е.В. Раскрой круглых сортиментов с ядровой гнилью на конструкционные пиломатериалы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 160–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-160-172

**Финансирование:** Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-674).

**Ключевые слова:** круглые лесоматериалы, ядровая гниль, уголкового элементы, несущие строительные конструкции, двутавровые балки, малоэтажное деревянное домостроение.

## CUTTING OF ROUND TIMBER WITH HEART ROT TO STRUCTURAL LUMBER

*Aleksandr S. Toropov*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAA-8881-2021](https://orcid.org/0000-0003-4414-2505),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-2505>

*Viktor E. Byzov*<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABC-4527-2020](https://orcid.org/0000-0002-2078-5226),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2078-5226>

*Evgeniya V. Toropova*<sup>1</sup>, Candidate of Economics, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-1783>

*Alexander V. Sergeevichev*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>

*Ekaterina V. Sazanova*<sup>4</sup>, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-8650-2019](https://orcid.org/0000-0001-5731-7517), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5731-7517>

<sup>1</sup>Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: Toropov\_A\_S@mail.ru, ef@volgatech.net

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: mapana@inbox.ru

<sup>3</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: 910sav@gmail.com

<sup>4</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: e.sazanova@narfu.ru

---

**Original article** / Received on December 29, 2020 / Accepted on March 23, 2021

---

**Abstract.** Softwood lumber is widely used for the manufacture of load-bearing structures. However, the quality of round timber for lumber manufacturing has been deteriorating recently. The average diameter of round timber entering sawmills is constantly decreasing, and heart rot is common in large-diameter round timber. This is due to the fact that more and more conifers in the forest are being affected by heart rot. The rot infestation is related to the deterioration of the ecological situation caused by environmental pollution. As a rule, the removal of rot occurs at the stage of round timber harvesting. Therefore, during harvesting, most of the wood with heart rot continues to remain in the forest. In addition to littering the

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

area, it continues to infect sound wood. At the same time, together with the wood affected by rot, the sound sapwood, which has good strength characteristics, is also removed. A method for processing round timber with heart rot into elements of load-bearing structures is proposed. In particular, a technological scheme for manufacturing I-beams from such timber has been developed for low-rise house construction. Corner elements are produced as a result of cutting round timber and removing heart rot by milling. The corner elements are dried in clamped state using special devices. Then they are glued together to obtain beams with a cross-section in the form of an I-beam. A set of equipment for the processing round timber with heart rot was selected. The paper presents the results of calculating the costs for organizing the production. The effectiveness of the technological project is evaluated using the method of discounted cashflows by the following indicators: net present value, profitability index, and discounted payback period. The assessment results confirm the effectiveness of the production organization of load-bearing structures made of round timber affected by heart rot. The processing of wood that remains in the forest into elements of building structures not only increases the wood reserves for construction, but also creates conditions for improving the ecological situation in forest areas.

**For citation:** Toropov A.S., Byzov V.E., Toropova E.V., Sergeevichev A.V., Sazanova E.V. Cutting of Round Timber with Heart Rot to Structural Lumber. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 160–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-160-172

**Funding:** The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-674) and the Center for Collective Use “Ecology, Biotechnology and Processes for Producing Environmentally Friendly Energy Carriers” of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

**Keywords:** round timber, heart rot, corner elements, load-bearing structures, I-beams, low-rise wooden house construction.

### Введение

Размерно-качественные характеристики лесоматериалов из древесины хвойных пород постоянно ухудшаются. Уменьшается средний диаметр лесоматериалов. Количество пиловочных бревен диаметром от 14 до 18 см составляет свыше половины общего количества всех круглых лесоматериалов, поступающих на лесопильные предприятия севера европейской части России [4]. Лесоматериалы большого диаметра имеют различного вида пороки. До 85 % сортиментов из древесины хвойных пород попадает в разряд низкокачественных по причине наличия напенной гнили. Гниль поражает ядровую древесину и выходит на один или оба торца сортимента. Такие лесоматериалы используют для производства технологической щепы на предприятиях химико-механической переработки древесного сырья или дровяной древесины.

Ядровая гниль, как правило, поражает сердцевинную часть ствола дерева, а древесина периферийной заболонной части остается здоровой и обладает высокими прочностными характеристиками. Наличие ядровой гнили в элементах строительных конструкций не допускается. Переработка круглых лесоматериалов с ядровой сердцевинной гнилью в целях производства пиломатериалов для изготовления строительных конструкций связана с большими затратами. Поэтому значительная часть заготовленной древесины, пораженной ядровой гнилью, на лесоперерабатывающие предприятия не вывозится и остается в лесу. Таким образом, теряется большое количество здорового, качественного сырья.

Раскрой круглых лесоматериалов с ядровой сердцевинной гнилью с целью получения изделий из древесины посвящены исследования [1, 11–13].

Приоритет многих способов переработки сортиментов с ядровой гнилью закреплен патентами Российской Федерации. Одним из таких способов является изготовление двутавровых балок из уголковых элементов (рис. 1) [1].

Рис. 1. Изготовление двутавровой балки: *a* – выпилка двух брусьев из круглых сортиментов с гнилью; *б* – удаление гнили фрезерованием и распиловка бруса на два бруска; *в* и *г* – склеивание двутавровой балки

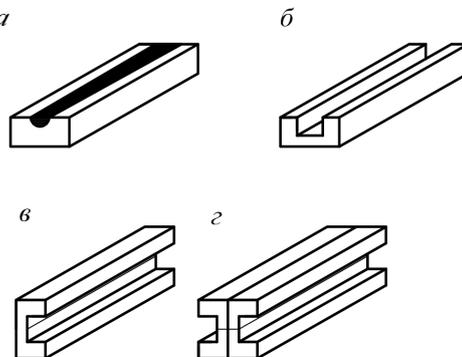


Fig. 1. Cutting out an I-beam: *a* – sawing out two beams from round timber with rot; *б* – removal of rot by milling and sawing a cant into two bars; *в* and *г* – gluing an I-beam

Схема поперечного сечения балки с размерами приведена на рис. 2.

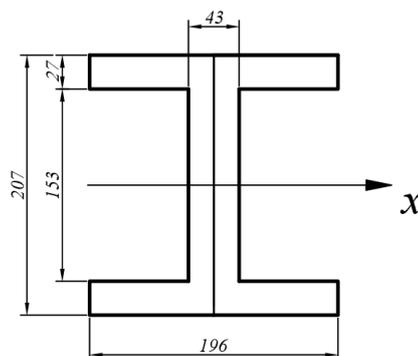


Рис. 2. Схема поперечного сечения двутавровой балки из уголковых элементов

Fig. 2. Diagram of the cross-section of an I-beam made of corner elements

Такие двутавровые балки применяются в малоэтажном деревянном домостроении, объемы которого за последние годы (с 2018 по 2021 гг.) выросли.

Современный опыт строительства показывает целесообразность использования двутавровых балок для пролетов от 2 до 6 м [3]. Высокая скорость монтажа и простота сборки повышают технологичность возведения зданий и сооружений. Двутавровые балки обладают такими преимуществами, как малый вес, большой запас прочности, легкость транспортировки и монтажа, экономичность. Небольшой вес 1 м длины балки, около 5 кгс, позволяет вести работы без применения тяжелой техники. После обработки специальными составами древесина балок обладает необходимым уровнем огнестойкости, противодействия загниванию и поражению насекомыми. Экологические свойства балок из древесины не подвергаются сомнению.

В балках, произведенных по технологии, предложенной в Канаде для изготовления полок, применяют калиброванный брус из клееной древесины, а стенки делают из ориентировано-стружечных плит OSB-3 и OSB-4. В российских условиях для стенок чаще всего используют фанеру и иногда брус многослойный клееный из шпона (ЛВЛ). Исследованиям особенностей двутавровых балок посвящено большое количество работ [5–8, 14–21]. Например, в [6] рассматривается влияние различных способов крепления, усиления и дефектов на напряженно-деформированное состояние балок в

процессе эксплуатации. Видно, что двутавровые балки из древесины для перекрытия небольших пролетов являются востребованными несущими конструкциями в малоэтажном домостроении.

В источнике [2] приведены результаты исследований по разработке технологии изготовления двутавровых балок из элементов, имеющих поперечное сечение в виде уголка, полученных в результате раскря круглых лесоматериалов с ядровой сердцевинной гнилью. Вопросы конвективной сушки элементов уголкового профиля до эксплуатационной влажности рассмотрены в статье [10]. Выполненные исследования подтверждают возможность изготовления двутавровых балок из элементов уголкового профиля, полученных в результате раскря круглых лесоматериалов с ядровой гнилью. Возникает задача практической проверки реальности организации такого процесса. До настоящего времени возможность производства двутавровых балок из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью не изучалась. Актуальность работы обусловлена необходимостью вовлечения в изготовление элементов строительных конструкций древесины, которая не использовалась для этих целей или просто оставалась в лесу, продолжая гнить.

Цель исследования – анализ возможности организации производства двутавровых балок из круглых лесоматериалов с ядровой сердцевинной гнилью.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектами исследований стали круглые лесоматериалы из древесины сосны длиной 6,25 м и диаметром в вершине 30 см с ядровой сердцевинной гнилью, выходящей на оба торца. Принята следующая технологическая схема. Круглые сортименты направляют на бревнотаску, которая перемещает их в цех распиловки. Бревна поступают на подающий транспортер торцовочного станка для поперечного раскря, где их торцуют на сортименты длиной 3,05 м. Сортименты сортируют по диаметру гнили. Максимальный размер ядровой гнили, выходящей на оба торца, ограничивается  $\frac{1}{3}$  вершинного диаметра сортимента. В зимнее время полученные сортименты выдерживают в цехе при температуре 18–20 °С.

На брусующем круглопильном станке сортименты подвергаются продольному раскря с получением двух брусьев с ядровой гнилью и короткомерных необрезных пиломатериалов. Брусья с ядровой гнилью раскраивают на однопильном ленточнопильном станке пополам по длине. Получают бруски с ядровой гнилью (рис. 1, *a*). Далее их обрабатывают на фрезерном станке, где ядровая гниль удаляется путем выборки четверти. В результате получают бруски Г-образного поперечного сечения. Режущим инструментом служит ножевая головка. Подача брусков в станок осуществляется вручную при помощи специального толкателя (в целях обеспечения безопасности).

Затем при нормальном режиме в камере периодического действия проводят сушку брусков Г-образного поперечного сечения. Необходимый температурный режим поддерживается в камере при помощи котельной установки, работающей на отходах производства (кусковые отходы, горбыль, опилки и стружка). Заготовки сушат, зажимая их парами и складывая четверть в четверть. После этого заготовки выдерживают в зажатом состоянии в течение

20 мин. Поперечное коробление, возникающее при сушке, приводит к отклонению от прямолинейности угла четверти. Его доводка до 90 °С осуществляется также на фрезерном станке. Затем бруски поступают на участок пропитки. На четверть бруска при помощи кисти наносят пропиточный состав и дают просохнуть.

После этого бруски готовы к склеиванию. Применяют холодный способ склеивания. На механическом прессе бруски попарно склеивают в балку двутаврового поперечного сечения (рис. 1, в, з). Выдержка в прессе составляет 30–40 мин. Склеенные балки торцуют по длине на торцовочном станке. Все транспортно-переместительные операции осуществляются при помощи грузоподъемных тележек вспомогательными рабочими.

Для проведения процесса принято следующее технологическое оборудование. Поперечный раскрой круглых лесоматериалов выполняют на торцовочном станке марки ТСБ-350; продольный раскрой с получением двух брусьев – гусеничным цепным круглопильным станком БГ 35-45; раскрой брусьев на два бруска – ленточнопильным станком марки НР-12Е; выборку четверти с удалением гнили и доводку сторон угла четверти до 90° – на станке ФС-1 с применением фрезерного и пильного инструмента; сушку – в конвективной камере периодического действия СКВК-24; выдержку в зажатом состоянии при склеивании – при помощи прессы марки ПВС 1,3; окончательное торцевание склеенных балок – торцовочным станком ТК18М. Изменение размерных характеристик обрабатываемых с применением указанных видов оборудования материалов приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Изменение размерных характеристик материалов  
при производстве двутавровых балок**

| Операция                                    | Характеристика заготовки до выполнения операции                            | Оборудование           |
|---|--|------------------------|
| Раскряжевка бревен на сортименты            | Сосна, $L = 6,25$ м, $d = 30$ см   | Станок ТСБ-350         |
| Сортировка по диаметру гнили, выдержка      | Сосна, $L = 3,05$ м, $d_{\text{гни}} = 10$ см                              | Сортировочная площадка |
| Продольный раскрой (получение двух брусьев) | Брус, $L = 3,05$ м, $H = 212$ мм, $B = 103$ мм                             | Станок БГ 35-45        |
| Продольный раскрой бруска на бруски         | Бруски, $L = 3,05$ м, $H = 103$ мм, $B = 103$ мм                           | Станок НР-12Е          |
| Выборка четверти (удаление гнили)           | Бруски, $L = 3,05$ м, $H = 102$ мм, $B = 102$ мм, $a = 50$ мм, $b = 50$ мм | Фреза ФС-1             |
| Сушка в зажатом состоянии, выдержка         | Бруски, $L = 3,05$ м, $H = 102$ мм, $B = 102$ мм, $a = 50$ мм, $b = 50$ мм | Камера СКВК-24         |
| Доводка угла четверти                       | Бруски, $L = 3,05$ м, $H = 100$ мм, $B = 100$ мм, $a = 50$ мм, $b = 50$ мм | Фреза ФС-1             |
| Нанесение пропиточного состава, выдержка    | Бруски, $L = 3,05$ м, $H = 100$ мм, $B = 100$ мм, $a = 50$ мм, $b = 50$ мм | Кисть                  |
| Склеивание                                  | Склеенная двутавровая балка, $L = 3,05$ м, $H = 200$ мм, $B = 100$ мм      | Пресс ПВС 1,3          |
| Торцевание в размер                         | Склеенная двутавровая балка, $L = 3,00$ м, $H = 200$ мм, $B = 100$ мм      | Станок ТК18М           |

Примечание:  $L$  – длина круглых лесоматериалов и полуфабрикатов;  $d$  – диаметр круглых лесоматериалов;  $d_{\text{гни}}$  – диаметр гнили;  $H$  – высота полуфабрикатов;  $B$  – ширина полуфабрикатов;  $a$  и  $b$  – размеры поперечного сечения выборки для удаления гнили.

Площадь участка для размещения оборудования составляет 800 м<sup>2</sup>. Далее выполнены расчеты производительности оборудования за смену (480 мин).

*Результаты исследования и их обсуждение*

Расчеты загрузки оборудования при изготовлении двутавровых балок позволили установить, что наиболее загруженным оборудованием являются пресс для склеивания брусков уголкового профиля и сушильная камера СКВК-24. Их загруженность составляет соответственно 77 и 62 %. Загрузка остального оборудования меньше, поэтому для выполнения работ использовали по одному станку для каждой операции, а для удаления гнили и доведения угла до значения 90° – 2 фрезерных станка ФП-1. В соответствии с производительностью наиболее загруженного станка, прессы для склеивания элементов уголкового поперечного сечения, выпуск двутавровых балок составляет 75 шт. в смену.

Для расчета затрат на изготовление двутавровых балок в качестве сырья взяли круглые лесоматериалы из древесины сосны. Их характеристики были следующие: диаметр в вершине – 30 см, длина – 6,25 м. Получаемые из этого сырья балки имеют высоту 200 мм, ширину полок 100 мм и длину 3 м. В результате обработки из 1 бревна выходит 2 двутавровые балки. Таким образом, с учетом 10 % потерь на технический брак в смену необходимо переработать 40 бревен. Объем одного бревна составляет 0,54 м<sup>3</sup>. Объем бревен, обрабатываемых за смену, – 21,6 м<sup>3</sup>. Работа односменная. Количество рабочих дней в году принимаем равным 242 дням. Тогда потребуется пиловочных бревен с сердцевинной ядровой гнилью  $21,6 \cdot 242,0 = 5227,2$  м<sup>3</sup>/год. Диаметр гнили в комлевом торце может достигать 0,3 диаметра лесоматериалов. Если средняя цена сосновых пиловочных бревен 1–2-го сорта по ГОСТ 9463–88 – 3500 р./м<sup>3</sup>, то цена лесоматериалов, пораженных сердцевинной ядровой гнилью, – 1200 р./м<sup>3</sup>. Таким образом, стоимость сырья для производства двутавровых балок составляет  $5227,20 \cdot 1200,00 = 6272,64$  тыс. р./год.

Подсчитана балансовая стоимость оборудования, необходимого для организации технологического процесса (табл. 2).

Производство балок осуществляется в одну смену. Продолжительность смены составляет 8 ч. Рассчитали расход электроэнергии для обеспечения технологического процесса. Цену 1 кВт/ч электроэнергии приняли равной 5 р. Стоимость электроэнергии для работы оборудования в течение смены – 9995,76 руб.

Установили фонд заработной платы работников, задействованных в производственном процессе. Затраты на заработную плату основных производственных рабочих при односменной работе составляют 3996 тыс. р. в год. Заработную плату основных рабочих в месяц приняли в зависимости от квалификации от 15 до 24 тыс. р. Число вспомогательных рабочих берем 6 человек, годовой фонд их заработной платы составляет 1080 тыс. р. Отчисления на социальные нужды для основных рабочих – 1542,5 тыс. р., вспомогательных – 420,12 тыс. р. Таким образом, общий фонд заработной платы основных рабочих составит 5538,5 тыс. р., а вспомогательных рабочих – 1500,12 тыс. р.

Таблица 2

## Балансовая стоимость оборудования для производства двутавровых балок

| Оборудование  | Марка    | Цена за единицу, тыс. р. | Количество | Стоимость, тыс. р. | Коэффициент доставки | Полная стоимость, тыс. р. |
|---|----------|--------------------------|------------|--------------------|----------------------|---------------------------|
| Погрузчик для перемещения бревен и пиломатериалов со сменным навесным оборудованием | GoodWork | 1200,0                   | 1          | 1200,0             | 1,1                  | 1320,0                    |
| Околостаночное оборудование станка для торцовки бревен                              | –        | 76,0                     | 1          | 76,0               | 1,1                  | 83,6                      |
| Торцовочный станок  | ТСБ-350  | 144,0                    | 1          | 144,0              | 1,1                  | 158,4                     |
| Тележка для перемещения пакетов заготовок   | –        | 7,0                      | 5          | 35,0               | 1,1                  | 38,5                      |
| Брусующий круглопильный станок  | БГ 35-45 | 349,6                    | 1          | 349,6              | 1,1                  | 384,6                     |
| Ленточно-делительный станок   | НР-12Е   | 791,1                    | 1          | 791,1              | 1,1                  | 870,2                     |
| Сушильная камера  | СКВК-24  | 1119,9*                  | 1          | 1119,9             | 1,1                  | 1231,9                    |
| Торцовочный станок  | ТК18М    | 63,6                     | 1          | 63,6               | 1,1                  | 70,0                      |
| <i>Итого</i>  |          |                          |            |                    |                      | 4380,5                    |

\*С учетом стоимости котельной установки «Прометей 120» (319,9 тыс. р.).

Количество работников охраны принимаем равным 3, их заработная плата составит 648 тыс. р. в год. Отчисления на социальные нужды из заработной платы работников охраны – 250,1 тыс. р. Общий фонд заработной платы – 898,1 тыс. р. в год.

Число ремонтных рабочих принимаем 2 человека. Работа двухсменная. В месяц за одну смену оплата труда составляет 18 тыс. р., таким образом за год затраты по данной статье расходов будут 432 тыс. р. Отчисления на социальные нужды – 166,3 тыс. р. Общий фонд заработной платы здесь – 598,3 тыс. р. в год.

Норму амортизационных отчислений взяли за 15 % от балансовой стоимости оборудования. Таким образом, на амортизационные отчисления необходимо 419,87 тыс. р. в год. Рассчитали затраты на запасные части и ремонтные материалы. Величину нормативных отчислений от балансовой стоимости оборудования приняли равной 26 %. Затраты составляют 737,77 тыс. р. в год.

Производительность цеха – 75 балок в смену. Объем одной балки – 0,0768 м<sup>3</sup>. Следовательно, объем выпускаемой готовой продукции в смену составляет 0,0768·75,0000 = 5,7600 м<sup>3</sup>.

За год будет выпущено 5,76·242,00 = 1393,92 м<sup>3</sup> балок. Цену двутавровых балок, изготовленных из лесоматериалов с ядровой гнилью, устанавливаем равной 830 р. за 1 пог. м. Цена балки длиной 3,0 м составляет 2490 р. При объеме балки 0,0768 м<sup>3</sup> стоимость 1 м<sup>3</sup> готовой продукции будет 32,4 тыс. р. Стоимость продукции, выпускаемой за год, – 1393,92·32,40 = 45129,31 тыс. р.

Величины затрат на организацию производства двутавровых балок приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Расчет затрат на производство двутавровых балок из лесоматериалов, пораженных сердцевинной гнилью**

| Статья затрат  | Сумма, тыс. р. |
|--|----------------|
| Закупка сырья  | 6272,64        |
| Стоимость пропиточного состава   | 2608,48        |
| Стоимость клея   | 3403,13        |
| Стоимость режущего инструмента   | 7608,60        |
| Заработная плата производственных рабочих с отчислениями на социальные нужды                               | 5538,5         |
| Заработная плата вспомогательных рабочих с отчислениями на социальные нужды                                | 1500,12        |
| Заработная плата ремонтных рабочих с отчислениями на социальные нужды                                      | 598,3          |
| Амортизационные отчисления   | 425,64         |
| Затраты на запасные части и ремонтные материалы  | 737,77         |
| Заработная плата работников охраны с отчислениями на социальные нужды                                      | 898,10         |
| Затраты на электроэнергию по основному оборудованию  | 10 144,56      |
| <i>Итого</i>   | 39 569,54      |
| Заработная плата инженерно-технических работников с отчислениями на социальные нужды (5 % от общих затрат) | 1978,48        |
| Аренда участка   | 2400,00        |
| <i>Итого</i>   | 44 114,32      |
| Прочее (10 %)  | 23 730,00      |

В табл. 4 представлены основные показатели проекта по изготовлению двутавровых балок из круглых лесоматериалов с сердцевинной ядровой гнилью.

Таблица 4

**Основные показатели проекта по выработке из круглых лесоматериалов, пораженных сердцевинной гнилью, двутавровых балок**

| Показатель   | Сумма, тыс. р. |
|--|----------------|
| Затраты на организацию производства продукции                          | 44 114,32      |
| Стоимость товарной продукции   | 45 129,31      |
| Балансовая прибыль проекта, в т. ч.:                                   | 1181,29        |
| сумма обязательных платежей в бюджет, из нее – налог на прибыль (35 %) | 413,45         |
| чистая прибыль предприятия   | 767,84         |
| капитальные вложения   | 4380,5         |

Для оценки экономической эффективности данного технологического проекта применили метод дисконтирования денежных потоков [9]. Чистая приведенная стоимость рассчитывается с использованием прогнозируемых денежных потоков, связанных с планируемыми вложениями в проект, по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{(1+R)^i} - I_{nv}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер периода реализации проекта (годы или месяцы);  $N$  – общая продолжительность реализации проекта, число целых периодов, лет или месяцев;  $P_i$  – сумма прибыли за отдельный период под номером  $i$ , называемая входящим отдельным денежным потоком;  $R$  – ставка дисконтирования;  $I_{nv}$  – начальные денежные вложения.

Для расчета показателя чистой приведенной стоимости приняли период общей реализации проекта, равный 10 годам. Капитальные вложения, согласно данным табл. 4, составляют 4380,5 тыс. р. Ставку дисконтирования взяли за 10 %. Размер прибыли за каждый год реализации проекта – постоянная величина, 767,84 тыс. р. (табл. 5).

Таблица 5

**Чистая приведенная стоимость производства двуглавых балок**

| Период реализации проекта        | Денежные потоки, тыс. р. | Ставка дисконтирования | Прибыль с учетом ставки дисконтирования, тыс. р. | Суммарное значение прибыли, тыс. р. |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------|--|-------------------------------------|
| Начальный период                 | -4380,50                 |                        |  |                                     |
| 1-й год                          | 767,84                   | 1,10                   | 698,04   | 698,04                              |
| 2-й год                          | 767,84                   | 1,21                   | 634,58   | 1332,62                             |
| 3-й год                          | 767,84                   | 1,33                   | 576,89   | 1909,51                             |
| 4-й год                          | 767,84                   | 1,46                   | 524,45   | 2433,96                             |
| 5-й год                          | 767,84                   | 1,61                   | 476,77   | 2910,73                             |
| 6-й год                          | 767,84                   | 1,77                   | 433,43   | 3344,16                             |
| 7-й год                          | 767,84                   | 1,95                   | 394,02   | 3738,18                             |
| 8-й год                          | 767,84                   | 2,14                   | 358,20   | 4096,38                             |
| 9-й год                          | 767,84                   | 2,36                   | 325,64   | 4422,02                             |
| 10-й год                         | 767,84                   | 2,59                   | 296,04   | 4718,06                             |
| Суммарный дисконтированный доход |                          |                        |  | 4718,06                             |
| $NPV$                            |                          |                        |  | 337,54                              |

Индекс рентабельности рассчитывается по формуле

$$PI = \frac{PV}{I_{nv}}, \quad (2)$$

где  $PV$  – сумма дисконтированного дохода.

Подставив значения суммарного дисконтированного дохода и величину начальных денежных вложений в формулу (2), получили значение  $PI$ , равное 1,077. Индекс рентабельности больше единицы, следовательно, проект выгоден.

Важным показателем целесообразности реализации проекта является срок окупаемости, т. е. предельный период, с которого начинает накапливаться  $NPV$ . Показатель не учитывает суммы чистого денежного потока, формирующиеся после периода окупаемости вложенных средств. Сумма дисконтированных доходов с 1-го по 8-й годы включительно составляет 4096,38 тыс. р., что меньше суммы вложенных средств, равной 4380,5 тыс. р. Сумма дисконтированных

доходов с 1-го по 9-й годы – 4422,02 тыс. р., а это превышает 4380,5 тыс. р. Дисконтированное значение прибыли за 9-й год реализации проекта составляет 325,64 тыс. р.

Срок окупаемости вложенных средств определяется по формуле

$$PP = \min n, \text{ при котором } \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{(1+R)^i} = I_{inv},$$

где  $n = N + m$ ;  $m$  – величина неполного периода реализации проекта, входящего в срок окупаемости,

$$m = 1 - \left( \frac{4422,02 - 4380,50}{325,64} \right) = 0,87.$$

Таким образом, срок окупаемости составляет 8,87 года.

Для определения внутренней нормы доходности используем формулу (1), внося в нее определенные изменения. Приравниваем чистую приведенную стоимость  $NPV$  к нулю. Подставляем в формулу денежные потоки проекта. В уравнении остается одна переменная –  $R$ . Ставка процента (решение данного уравнения), при которой сумма всех слагаемых будет равна нулю, и станет  $IRR$ , или внутренней нормой доходности. Это означает, что при такой ставке происходит простой возврат средств, вложенных в проект. Тогда формула (1) будет выглядеть следующим образом:

$$0 = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{(1+IRR)^i} - I_{inv}.$$

Для решения этого уравнения воспользовались встроенной в программу Excel функцией ВСД. Значение  $IRR$  равно 0,12, или 12%. Это и будет внутренняя норма доходности.

Оценка эффективности технологического проекта производства деревянных двутавровых балок из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью подтверждает целесообразность применения метода дисконтированных денежных потоков по показателям: чистая приведенная стоимость, индекс доходности и дисконтированный срок окупаемости.

#### Выводы

1. Организация производства двутавровых балок из круглых лесоматериалов с сердцевинной ядровой гнилью экономически целесообразна.
2. Применение выбранного оборудования обеспечивает выпуск 75 балок в смену (480 мин).
3. Капитальные вложения при организации производства двутавровых балок составляют 4380,5 тыс. р.
4. Чистая приведенная стоимость проекта – 337,54 тыс. р.
5. Окупаемость проекта – 8,87 года.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Воронцов Ю.Ф., Суrowцева Л.С. Эффективность специализации лесопильных предприятий по группам диаметров пиловочного сырья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2002. № 5. С. 90–94. Vorontsov Yu.F., Surovtseva L.S. Efficiency of Sawmills' Specialization

according to Diameter Groups of Sawn Raw Material. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2002, no. 5, pp. 90–94. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/12b/12b10b1bb05d1d181119f823c0adbc09.pdf>

2. Воронцова Н.А., Филатов Н.В., Шестопалов Е.Г. Использование клефанерных элементов с перфорированными стенками в конструкциях малоэтажных деревянных зданий // Вологодские чтения. 2012. № 80. С. 74–76. Vorontsova N.A., Filatov N.V., Shestopalov E.G. Use of Cell Kleefanernyh with Perforated Walls in Building Structures Low-Rise Wooden. *Vologdinskiye chteniya*, 2012, no. 80, pp. 74–76.

3. Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой // Инж.-строит. журн. 2015. № 2(54). С. 77–85. Karelskiy A.V., Zhuravleva T.P., Labudin B.V. Load-to Failure Bending Test of Wood Composite Beams Connected by Gang Nail. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2015, no. 2(54), pp. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.54.9>

4. Кузнецов И.Л., Гимранов Л.Р., Крайнов И.В. Разработка и исследование клефанерной двутавровой балки // Изв. Казан. ГАСУ. 2013. № 2(24). С. 108–112. Kuznetsov I.L., Gimranov L.R., Kraynov I.V. Development and Research of Glue-Laminated Plywood I-Beam. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering], 2013, no. 2(24), pp. 108–112.

5. Синцов А.В., Синцов В.П. Прочность и деформативность составной деревянной балки со стенкой из ориентированной стружечной плиты // Строительство и техногенная безопасность. 2014. № 50. С. 152–158. Sintsov A.V., Sintsov V.P. Strength and Deformability of a Composite Wooden Beam with an Oriented Strand Board Wall. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* [Construction and industrial safety], 2014, no. 50, pp. 152–158. DOI: <https://doi.org/10.37279/2413-1873>

6. Сутягин В.Ю. Нюансы оценки инвестиционных проектов // Социально-экономические явления и процессы. 2014. Т. 9. № 10. С. 87–101. Sutyagin V.Yu. Nuances of the Assessment of Investment Projects. *Sotsial'no-ekonomicheskiye yavleniya i protsessy* [Social-Economic Phenomena and Processes], 2014, vol. 9, no. 10, pp. 87–101.

7. Торопов А.С., Бызов В.Е., Торопов С.А. Производство пиломатериалов для строительства из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 133–145. Toropov A.S., Byzov V.E., Toropov S.A. Lumber Production for Construction from Round Timber with Heart Rot. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 133–145. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.133>

8. Торопов А.С., Торопов С.А., Микрюкова Е.В. Исследование пораженности древесины напенной гнилью // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 4. С. 95–100. Toropov A.S., Toropov S.A., Mikryukova E.V. Investigation of Wood Affected by Stump Rot. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 4, pp. 95–100. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/eb2/eb2a4ad3da8cb6509a4164b19962c3e3.pdf>

9. Туснин А.Р., Прокич М. Экспериментальные исследования работы балок двутаврового сечения при действии изгиба и кручения // Инж.-строит. журн. 2015. № 1(53). С. 24–31. Tusnin A.R., Prokic M. Experimental Research of I-Beams under Bending and Torsion Actions. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2015, no. 1(53), pp. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.53.3>

10. Benjeddou O., Limam O., Ouezdou M.B. Experimental and Theoretical Study of a Foldable Composite Beam. *Engineering Structures*, 2012, vol. 44, pp. 312–321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.011>

11. Byzov V.E. Wooden I-Beams Made of Round Timber with a Core Rot. *American Journal of Construction and Building Materials*, 2018, vol. 2, iss. 1, pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajcbm.20180201.13>

12. Byzov V.E., Melekhov V.I., Toropov A.S. Production of Wooden I-Beams from Angular Elements for Low-Rise Housing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012048. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012048>
13. Challamel N., Girhammar U.A. Lateral-Torsional Buckling of Vertically Layered Composite Beams with Interlayer Slip under Uniform Moment. *Engineering Structures*, 2012, vol. 34, pp. 505–513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.004>
14. Fernando D., Frangi A., Kobel P. Behavior of Basalt Fiber Reinforced Polymer Strengthened Timber Laminates under Tensile Loading. *Engineering Structures*, 2016, vol. 117, pp. 437–456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.009>
15. Harte A., Baylor G. Structural Evaluation of Castellated Timber I-Joists. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, iss. 12, pp. 3748–3754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.011>
16. Hu C., Xiao M., Zhou H., Wen W., Yun H. Damage Detection of Wood Beams Using the Differences in Local Modal Flexibility. *Journal of Wood Science*, 2011, vol. 57, pp. 479–483. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-011-1200-3>
17. Khorsandnia N., Valipour H., Crews K. Nonlinear Finite Element Analysis of Timber Beams and Joints Using the Layered Approach and Hypoelastic Constitutive Law. *Engineering Structures*, 2013, vol. 46, pp. 606–614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.017>
18. O’Loinsigh C., Oudjene M., Shotton E., Pizzi A., Fanning P. Mechanical Behavior and 3D Stress Analysis of Multi-Layered Wooden Beams Made with Welded-Through Wood Dowels. *Composite Structures*, 2012, vol. 94, iss. 2, pp. 313–321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.029>
19. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovskiy O.L. Ultra-Light Hybrid Composite Wood-Polymer Structural Materials in Construction. *Inzhenerno-stroitel’nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2018, no. 3(79), pp. 132–139. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.79.14>
20. Toropov A.S., Byzov V.E., Melekhov V.I. Manufacturing Structural Building Components from Round Timber with Heartwood Rot. *Inzhenerno-stroitel’nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2019, vol. 86(2), pp. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.86.2>
21. Toropov A.S., Byzov V.E., Melekhov V.I. Deformations during Drying of Wooden Corner Elements of I-Beams. *Inzhenerno-stroitel’nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2020, no. 99(7), art. 9913. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.99.13>



УДК 661.728

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-173-183

**ОТБЕЛКА МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ,  
ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОГО ГИДРОЛИЗА***А.И. Сизов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-2030-2020](https://orcid.org/0000-0001-9412-5557),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>**С.Д. Пименов<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [AAC-9435-2020](https://orcid.org/0000-0001-6042-0021),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>**А.Д. Строителева<sup>2</sup>, химик-аналитик; ResearcherID: [AAL-9152-2020](https://orcid.org/0000-0002-9031-0007),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9031-0007>**Е.Д. Строителева<sup>2</sup>, химик-аналитик; ResearcherID: [AAL-9208-2020](https://orcid.org/0000-0001-5888-9349),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5888-9349>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021;

e-mail: [sizov.alex@gmail.com](mailto:sizov.alex@gmail.com), [chudopim@mail.ru](mailto:chudopim@mail.ru)

<sup>2</sup>ООО «Кристалл», ул. Шахматова, д. 10, оф. 131, Санкт-Петербург, Россия, 198504;

e-mail: [anastasia\\_stroiteleva1019@mail.ru](mailto:anastasia_stroiteleva1019@mail.ru), [katherine\\_stroiteleva1007@mail.ru](mailto:katherine_stroiteleva1007@mail.ru)

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 25.04.20 / Принята к печати 16.06.20

**Аннотация.** Одним из основных потребителей микрокристаллической целлюлозы является фармацевтическая промышленность, где такую целлюлозу используют в качестве связующего компонента и наполнителя при прямом прессовании таблеток. Микрокристаллическую целлюлозу получают кислотным гидролизом целлюлозы, при этом, как правило, происходит снижение ее белизны, что связано с деструкцией образующихся при гидролизе сахаров и последующим образованием окрашенных продуктов. Их состав и свойства зависят от способа гидролиза, концентрации кислоты, температуры и времени проведения процесса. Одним из наиболее перспективных методов получения микрокристаллической целлюлозы является газозофазный гидролиз целлюлозы газозо-воздушными смесями хлористого водорода. Способ отличается высокой скоростью протекания гидролиза, низкими расходом реагентов и энергетическими затратами. Требования фармацевтической промышленности определяют необходимость получения микрокристаллической целлюлозы с высокой белизной. Цель работы – подбор режимов отбеливания микрокристаллической целлюлозы с использованием в качестве отбеливающих агентов гипохлорита натрия и пероксида водорода. Для исследования брали микрокристаллическую целлюлозу, полученную газозофазным гидролизом белевой древесной целлюлозы. Белизну и величину желтого оттенка микрокристаллической целлюлозы определяли методом цифровой цветометрии на планшетном сканере. Показано, что гипохлорит натрия и пероксид водорода позволяют достичь белизны не менее 90 % и интенсивности желтого оттенка не более 3 усл. ед. Качественная отбелка может быть проведена даже для образцов микрокристаллической целлюлозы с исходной белизной около 40 %. Гипохлорит натрия отбеливает наиболее эффективно при рН отбелочного раствора 2...3. Пероксид водорода при рН 10...11 также позволяет добиться высокой белизны микрокристаллической целлюлозы, однако расход активного кислорода в этом

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

случае более чем в 3 раза выше в сравнении с расходом активного хлора. Установлено, что красящие вещества микрокристаллической целлюлозы, полученной методом газофазного гидролиза, состоят из двух хромофорных групп, обесцвечивающихся с различной скоростью. Легкоокисляемая группа компонентов составляет около 90 % от общего количества красящих веществ, а трудноокисляемые компоненты – около 10 % и обуславливают интенсивность желтого оттенка микрокристаллической целлюлозы. Определены режимы отбеливания микрокристаллической целлюлозы гипохлоритом натрия и пероксидом водорода с получением образцов, имеющих белизну, сравнимую с белизной импортных образцов.

**Для цитирования:** Сизов А.И., Пименов С.Д., Строителева А.Д., Строителева Е.Д. Отбеливание микрокристаллической целлюлозы, полученной методом газофазного гидролиза // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 173–183. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-173-183

**Ключевые слова:** отбеливание, микрокристаллическая целлюлоза, отбеливающие агенты, гипохлорит натрия, пероксид водорода, газофазный гидролиз целлюлозы.

## BLEACHING OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE PRODUCED BY GAS-PHASE HYDROLYSIS

*Alexander I. Sizov<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

*ResearcherID: [AAI-2030-2020](https://orcid.org/0000-0001-9412-5557), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>*

*Sergey D. Pimenov<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAC-9435-2020](https://orcid.org/0000-0001-6042-0021),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>*

*Anastasia D. Stroiteleva<sup>2</sup>, Analytical Chemist; ResearcherID: [AAL-9152-2020](https://orcid.org/0000-0002-9031-0007),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9031-0007>*

*Katherine D. Stroiteleva<sup>2</sup>, Analytical Chemist; ResearcherID: [AAL-9208-2020](https://orcid.org/0000-0001-5888-9349),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5888-9349>*

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Liter U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation;

e-mail: [sizov.alex@gmail.com](mailto:sizov.alex@gmail.com), [chudopim@mail.ru](mailto:chudopim@mail.ru)

<sup>2</sup>ООО “Kristatsel”, ul. Shakhmatova, 10, of. 131, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation; e-mail: [anastasia\\_stroiteleva1019@mail.ru](mailto:anastasia_stroiteleva1019@mail.ru), [katherine\\_stroiteleva1007@mail.ru](mailto:katherine_stroiteleva1007@mail.ru)

---

**Original article** / Received on April 25, 2020 / Accepted on June 16, 2020

---

**Abstract.** One of the main consumers of microcrystalline cellulose (MCC) is the pharmaceutical industry, where MCC is used as a binder and filler in direct compression of tablets. MCC is produced by acidic hydrolysis of cellulose, which usually results in a decrease in whiteness. This is due to the destruction of sugars formed during hydrolysis and the subsequent formation of colored products. The composition and properties of these products depend on the method of hydrolysis, acid concentration, temperature, and process duration. One of the most promising methods for producing MCC is gas-phase hydrolysis of cellulose with hydrogen chloride gas-air mixtures. The method has a high rate of hydrolysis, low reagent and energy consumption. The requirements of the pharmaceutical industry determine the need to produce MCC with high whiteness. The research purpose is to select bleaching modes for MCC using sodium hypochlorite and hydrogen peroxide as bleaching agents. MCC produced by gas-phase hydrolysis of bleached wood pulp was used during the study. The whiteness and intensity of the yellow tint of MCC in the bleaching process were determined by digital colorimetry on a flatbed scanner. The paper shows that sodium hypochlorite and hydrogen peroxide allow achieving the whiteness not less than 90 % and the intensity of the yellow tint not more than 3 standard units. High-quality bleaching can be carried out even for MCC

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

samples with an initial whiteness of about 40 %. The most effective bleaching agent is sodium hypochlorite when the pH of the bleaching solution is 2–3. Hydrogen peroxide also provides high whiteness of MCC at pH of 10–11. However, the consumption of active oxygen (AO) for bleaching is more than three times higher in comparison with the consumption of active chlorine (ACh). It was found that the dyes of MCC produced by gas-phase hydrolysis consist of two chromophore groups that decolorize at different rates. The easily oxidized group of components makes up about 90 % of the total amount of dyes, and the resistant to oxidation components make up about 10 % and determine the intensity of the yellow tint of MCC. The modes of bleaching MCC with sodium hypochlorite and hydrogen peroxide to produce samples with whiteness comparable to that of imported samples were determined.

**For citation:** Sizov A.I., Pimenov S.D., Stroiteleva A.D., Stroiteleva K.D. Bleaching of Microcrystalline Cellulose Produced by Gas-Phase Hydrolysis. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 173–183. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-173-183

*Keywords:* bleaching, microcrystalline cellulose, bleaching agents, sodium hypochlorite, hydrogen peroxide, gas-phase hydrolysis of cellulose.

### *Введение*

Микрокристаллическую целлюлозу (МКЦ) используют во многих отраслях производства. Одним из основных потребителей является фармацевтическая промышленность, где МКЦ применяют в качестве связующего компонента и наполнителя при прямом прессовании таблеток.

МКЦ получают кислотным гидролизом целлюлозы, при этом, как правило, происходит снижение белизны исходного сырья [10, 21]. Потемнение обусловлено деструкцией образующихся при гидролизе сахаров с последующим образованием окрашенных продуктов. Состав и свойства этих продуктов зависят от способа гидролиза, температуры, концентрации кислоты и времени проведения процесса. В некоторых случаях белизна целлюлозы после гидролиза уменьшается на 20–50 % по сравнению с исходной [10, 21]. Существует ряд патентов, посвященных описанию методов отбеливания МКЦ (с использованием гипохлорита натрия и пероксида водорода), полученной различными способами [18, 14].

Одним из наиболее перспективных методов получения МКЦ является газофазный гидролиз целлюлозы хлористым водородом. Способ отличается высокой скоростью гидролиза, низкими расходом реагентов и энергетическими затратами [7, 9]. Так как этот метод описан в литературе относительно недавно, сведения об отбеливании МКЦ, полученной при помощи этого способа, отсутствуют, что обусловило наш интерес к изучению данного аспекта.

МКЦ как продукт, используемый в фармацевтической промышленности, должна обладать высокой белизной и однородностью, из чего следует, что процесс отбеливания является одной из основных стадий производства МКЦ.

Целью настоящей работы стало исследование процесса отбеливания МКЦ, полученной методом газофазного гидролиза хлористым водородом, с сопутствующим поиском режимов отбеливания, необходимых для обеспечения высокой белизны продукта, чтобы его возможно было использовать в фармацевтической промышленности.

*Объекты и методы исследования*

В качестве целлюлозного материала для газофазного гидролиза использовали сульфатную беленую целлюлозу из лиственных пород марки ЛС-0 по ГОСТ 28172–89 Усть-Илимского целлюлозно-бумажного комбината (исходная белизна в соответствии с ГОСТ – не менее 89 %). Сначала целлюлозу измельчали на шредере до размера частиц 3×30 мм. Для проведения гидролиза измельченную целлюлозу влажностью 10...12 % обрабатывали 25 %-й газовой смесью хлороводорода при температуре 45 °С в течение 15 мин. МКЦ суспендировали в воде и нейтрализовали до pH = 2 концентрированным раствором едкого натра. Отбелку проводили в термостатических условиях в снабженном мешалкой химическом стакане вместимостью 1 л при гидромодуле (ГМ) 10. Через каждые 15 мин отбирали пробы суспензии, далее их фильтровали через стеклянный пористый фильтр Шотта S1, выполняли анализ фильтрата, а остаток МКЦ на фильтре промывали сначала подкисленной дистиллированной водой (нейтрализовали избыток щелочи соляной кислотой с нормальной концентрацией (молярной концентрацией эквивалента, или нормальностью) 0,1 моль-экв/л), а затем дистиллированной водой до нейтральной реакции по метилоранжу.

В фильтрате, полученном после фильтрации отбеленной пробы суспензии, определяли концентрацию активного хлора (АХ) иодометрическим титрованием, концентрацию активного кислорода (АК) – методом перманганатометрии [3].

Белизну образцов МКЦ анализировали методом цифровой цветометрии на сканере с контактным датчиком изображения (CIS, ContactImageSensor) [1, 4]. Сканирование проводили на планшетном сканере HP 1120 ML (Китай), использовали цветовой режим TrueColor (16,5 млн цветовых оттенков), оптическое разрешение – 600 dpi.

Количественную оценку белизны осуществляли в рамках цветовой модели RGB, где яркость измеряется от 0 (минимум) до 255 (максимум) усл. ед., а цвет определяется смешиванием красного (R), зеленого (G) и синего (B) каналов [5, 6]. Белому цвету соответствует R – 255, G – 255, B – 255.

При анализе и обработке изображений использовали графический редактор GIMP 2.8, позволяющий получать усредненные значения яркостей красного, зеленого и синего каналов для выделяемой области. Количественное выражение белизны, т. е. степень приближения к идеально белому цвету, осуществляли через относительную белизну [8, 16, 17]:

$$W_c = \frac{R + G + B}{R_0 + G_0 + B_0}$$

где  $W_c$  – относительная белизна исследуемого образца вещества по показаниям сканера, %; R, G, B – яркости красного, зеленого и синего каналов соответственно, характеризующие окраску исследуемого образца вещества, усл. ед.;  $R_0, G_0, B_0$  – яркости красного, зеленого и синего каналов соответственно, обуславливающие абсолютно белый цвет вещества,  $R_0, G_0, B_0 = 255$  усл. ед.

Кроме белизны для визуальной оценки внешнего вида материала большое значение имеет характеристика цветовых оттенков. Целлюлозе и материалам на ее основе, как правило, свойственен желтый оттенок, который является нежелательным показателем их внешнего вида, особенно для фармацевтического производства. Для снижения степени желтизны применяют различные

добавки, увеличивающие синюю составляющую в спектре отраженного света (ультрамарин, оптические отбеливатели).

Количественную характеристику желтого оттенка целлюлозных материалов определяли как разницу между средней яркостью всех каналов и относительной яркостью синего канала:

$$K_{\text{ж}} = \frac{R + G + B}{3} - B,$$

где  $K_{\text{ж}}$  – интенсивность желтого оттенка, усл. ед.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В табл. 1 приведены результаты анализа образцов МКЦ различных иностранных производителей, полученные сканированием образцов по методу цифровой цветометрии. Визуально белизна образцов почти одинакова, хотя RGB-спектры фиксируют незначительное отличие в интенсивности желтого оттенка. В данной работе условия отбеливания МКЦ были ориентированы на достижение белизны конечного продукта не менее 90 % и интенсивности желтого оттенка не более 3 усл. ед.

Таблица 1

**Белизна и интенсивность желтого оттенка образцов МКЦ различных производителей**

| Марка образца МКЦ   | RGB <sub>ср</sub> ,<br>усл. ед. | B,<br>усл. ед. | $K_{\text{ж}}$ ,<br>усл. ед. | $W_{\text{с}}$ , % |
|---|---------------------------------|----------------|------------------------------|--------------------|
| Образец из Санкт-Петербургского государственного химико-фармацевтического университета (импорт) | 253,1                           | 251            | 2,1                          | 90,9               |
| Prosolv “JRSpharma” (Германия)  | 253,5                           | 252            | 1,5                          | 91,2               |
| MCC102D+ “JRSpharma” (Германия)   | 252,5                           | 250            | 2,5                          | 90,8               |
| Vivapur 101 “JRS pharma” (Германия)   | 251,7                           | 250            | 1,7                          | 90,1               |
| HiCel “Sigachi Industries” (Индия)  | 252,3                           | 249            | 3,3                          | 90,5               |

*Отбеливание микрокристаллической целлюлозы гипохлоритом натрия.* Гипохлорит натрия как отбеливающий агент находит широкое применение в различных отраслях промышленности – текстильной, целлюлозно-бумажной и др. Активному использованию гипохлорита способствуют его низкая цена, высокие белильные свойства и возможность вступать в реакцию при низких температурах.

Известно, что pH среды сильно влияет на процесс отбеливания различных материалов гипохлоритом натрия, т. к. в зависимости от pH белильными агентами выступают  $\text{Cl}_2$  и  $\text{ClO}^-$  [11]. На рис. 1 приведена динамика изменений белизны и интенсивности желтого оттенка МКЦ при отбеливании гипохлоритом натрия при pH = 2 и pH = 5,2. Как видно из данных, отбеливание гипохлоритом натрия при pH = 2 протекает очень интенсивно и позволяет достичь требуемой белизны (более 90 %) менее чем за 30 мин. Интенсивность желтого оттенка МКЦ также снижается, однако для достижения требуемой величины (не более 3 усл. ед.) длительность процесса должна быть не менее 45 мин. Полученные результаты указывают на наличие в МКЦ разнородных хромофорных компонентов, которые окисляются хлором с различной скоростью.

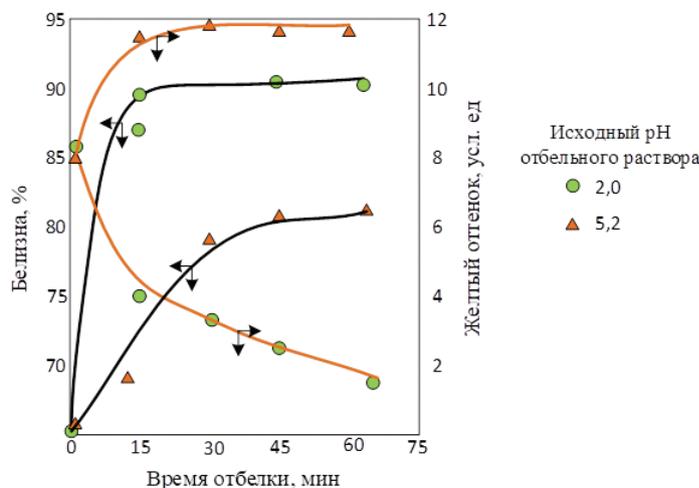


Рис. 1. Динамика изменения белизны и интенсивности желтого оттенка образцов МКЦ при различных pH отбеляющего раствора с гипохлоритом натрия ( $t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ГМ = 10; исходная концентрация АХ  $C_{\text{АХ}} = 1000\text{ мг/л}$ )

Fig. 1. Dynamics of whiteness and yellow tint intensity of the MCC samples at different pH values of the bleaching solution with sodium hypochlorite:  $t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; HM (hydromodule) = 10; initial concentration of ACh  $C_{\text{ACh}} = 1000\text{ mg/L}$

Обработка МКЦ гипохлоритом натрия при  $\text{pH} = 5,2$  показывает, что при более высоком pH процесс протекает медленнее, а интенсивность желтого оттенка даже имеет тенденцию к росту.

В процессе гидролиза целлюлозы с использованием газофазного хлористого водорода может происходить значительное потемнение материала. Снижение исходной белизны при неудачно выбранном режиме гидролиза составляет более 50 %. Для оценки возможности отбеливания МКЦ с очень низкой исходной белизной проведены соответствующие эксперименты (рис. 2). Как видно из полученных данных, МКЦ после гидролиза возможно отбелить гипохлоритом натрия до требуемой белизны (не менее 90 %) даже при исходной белизне около 40 %. Однако расход АХ при этом увеличивался почти в 2 раза – с 3500 до 6500 мг АХ/кг МКЦ.

По данным исследования произведен расчет режима отбеливания гипохлоритом натрия МКЦ с различной исходной белизной. Результаты приведены в табл. 2.

*Отбеливание микрокристаллической целлюлозы пероксидом водорода.* Отбеливание целлюлозы хлорсодержащими реагентами загрязняет окружающую среду токсичными хлорорганическими соединениями. Современные технологии отбеливания предполагают снижение или полную замену хлорирования отбеливанием пероксидами [11]. Поэтому, несмотря на высокую эффективность и простоту процесса отбеливания МКЦ гипохлоритом натрия, были проведены исследования по отбеливанию МКЦ с использованием пероксида водорода.

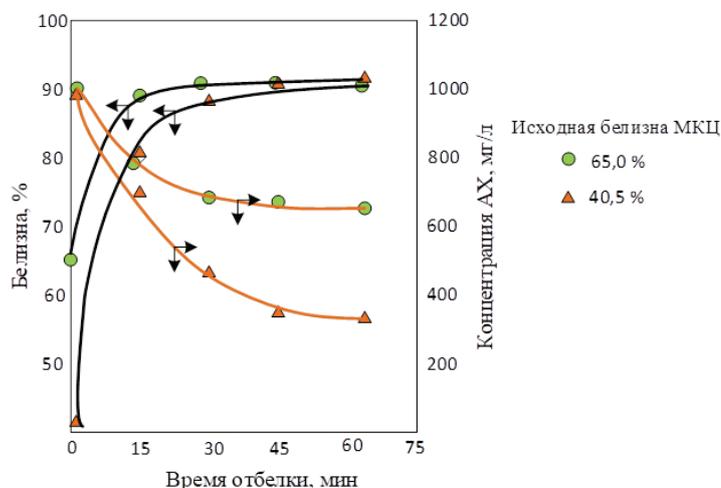


Рис. 2. Динамика изменения белизны и концентрации АХ в отбельном растворе при отбелке гипохлоритом натрия образцов МКЦ с различной исходной белизной ( $pH = 2$ ;  $t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ГМ = 10)

Fig. 2. Dynamics of whiteness and concentration of ACh in the bleaching solution during sodium hypochlorite bleaching of the MCC samples with different initial whiteness:  $pH = 2$ ;  $t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; HM = 10

Таблица 2

**Параметры режима отбелки гипохлоритом натрия МКЦ с различной исходной белизной до достижения конечной белизны 90 % и интенсивности желтого оттенка не более 3 усл. ед**

| Исходная белизна МКЦ, % | pH    | $t$ , $^{\circ}\text{C}$ | ГМ | Расход АХ, г/кг | Расход гипохлорита натрия (15 % АХ) на 1 т МКЦ, кг | Продолжительность отбелки, мин |
|-------------------------|-------|--------------------------|----|-----------------|--|--------------------------------|
| 40                      | 2...3 | 20...25                  | 10 | 6,1             | 0,32   | 60                             |
| 50                      |       |                          |    | 5,6             | 0,30   | 60                             |
| 60                      |       |                          |    | 5,2             | 0,27   | 40                             |
| 70                      |       |                          |    | 4,7             | 0,25   | 40                             |

В патентной литературе описаны способы отбелки МКЦ пероксидом водорода [12, 13, 15, 19, 20]. Известно, что отбелку целлюлозы кислородом воздуха и пероксидом водорода проводят только в щелочной среде и при повышенных температурах [2].

На рис. 3, где приведена динамика изменения белизны и интенсивности желтого оттенка при отбелке МКЦ пероксидом водорода с различными исходными pH отбельного раствора, видно, что отбелка пероксидом водорода позволяет достичь требуемой белизны МКЦ (не менее 90 %) при всех взятых первоначальных pH, интенсивность желтого оттенка превышает требуемую величину (не более 3 усл. ед.). Примечательно, что при увеличении времени

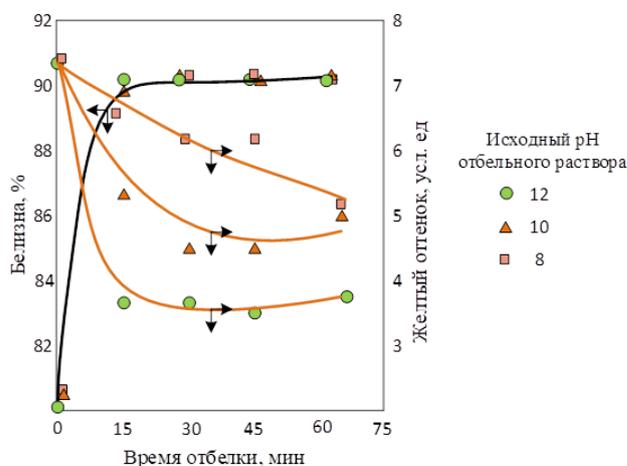


Рис. 3. Динамика изменения белизны и интенсивности желтого оттенка при отбелке МКЦ пероксидом водорода с различными исходными рН отбелочного раствора ( $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ГМ = 10; исходная концентрация АК  $C_{\text{АК}} = 2000\text{ мг/л}$ )

Fig. 3. Dynamics of whiteness and yellow tint intensity in MCC bleaching with hydrogen peroxide with different initial pH values of the bleaching solution:  $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; HM = 10; initial concentration of AO  $C_{\text{AO}} = 2000\text{ mg/L}$

процесса отбелки интенсивность желтого оттенка (особенно при исходных величинах рН 8 и 12), несмотря на наличие остаточного АК, возрастает.

Анализируя данные рис. 3, можно предположить, что красящие вещества МКЦ состоят из двух групп компонентов. Для 1-й группы компонентов – легкоокисляемых АК – характерно быстрое обесцвечивание в широком диапазоне рН от 8 до 12. Эта группа определяет более 90 % общей цветности МКЦ. 2-я группа компонентов – трудноокисляемых АК – составляет менее 10 % общей цветности и обуславливает желтый оттенок МКЦ. Для компонентов данной группы скорость окисления в значительной степени определяется рН отбелочного раствора. При рН менее 7 снижения интенсивности желтого оттенка практически не происходит [10].

Увеличение рН отбелочного раствора приводит к росту расхода АК. Так, при рН = 12 расход АК в 2 раза выше, чем для рН = 8. Это, на наш взгляд, связано с быстрым распадом пероксида водорода в щелочной среде.

Наибольшее снижение интенсивности желтого оттенка образцов МКЦ при отбелке пероксидом водорода до требуемых значений происходит при рН отбелочного раствора 10...11. Однако интенсивность желтого оттенка МКЦ при исходной концентрации АК 2000 мг/л превышает требуемое значение и составляет более 5 усл. ед. Для снижения показателя была исследована зависимость интенсивности желтого оттенка от концентрации пероксида водорода.

Данные о динамике изменения белизны и интенсивности желтого оттенка образцов МКЦ в зависимости от концентрации пероксида водорода представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Изменение белизны и интенсивности желтого оттенка МКЦ в зависимости от концентрации пероксида водорода ( $pH = 10-11$ ;  $t = 60$  °С; исходная белизна МКЦ – 65 %; время отбели – 60 мин)**

| Концентрация АК, мг/л | Расход АК, г/кг МКЦ | Белизна, % | Интенсивность желтого оттенка, усл. ед. |
|-----------------------|---------------------|------------|---|
| 2000                  | 12,2                | 90,7       | 3,5                                     |
| 3700                  | 27,0                | 90,6       | 2,9                                     |
| 5000                  | 43,1                | 90,8       | 3,0                                     |

Как видно из табл. 3, стабилизация pH в диапазоне 10...11 и увеличение концентрации АК до 3700 мг/л позволяют добиться необходимых белизны и интенсивности желтого оттенка МКЦ.

Известно, что скорость химических реакций зависит от температуры. Для определения влияния температуры на процесс отбели МКЦ были проведены исследования зависимости белизны и интенсивности желтого оттенка МКЦ от температуры отбели (табл. 4).

Таблица 4

**Изменение белизны и интенсивности желтого оттенка при отбели МКЦ пероксидом водорода при различных температурах ( $pH = 10$ ; исходная белизна МКЦ – 65 %; исходная концентрация АК  $C_{AK} = 2000$  мг/л; время отбели – 60 мин)**

| Температура отбели, °С | Расход АК, г/кг МКЦ | Белизна, % | Интенсивность желтого оттенка, усл. ед. |
|------------------------|---------------------|------------|---|
| 60                     | 12,2                | 90,7       | 3,5                                     |
| 80                     | 13,6                | 90,3       | 3,6                                     |
| 100                    | 14,1                | 90,4       | 4,2                                     |

Данные табл. 4 позволяют заключить, что увеличение температуры отбели почти не повышает белизну и практически не снижает желтый оттенок МКЦ. В то же время расход АК при увеличении температуры отбели возрастает, это связано, по нашему мнению, с разложением части пероксида водорода.

В табл. 5 приведены данные по отбели пероксидом водорода МКЦ с различной исходной белизной.

Таблица 5

**Параметры режима отбели МКЦ с различной исходной белизной пероксидом водорода до достижения конечной белизны МКЦ 90 % и интенсивности желтого оттенка не более 3 усл. ед.**

| Исходная белизна МКЦ, % | pH      | t, °С | ГМ | Расход АК, г/кг | Расход перекиси водорода (40 % АК) на 1 т МКЦ, кг | Продолжительность отбели, мин |
|-------------------------|---------|-------|----|-----------------|---|-------------------------------|
| 40                      | 10...11 | 60    | 10 | 27,5            | 69,0  | 60                            |
| 50                      |         |       |    | 27,2            | 69,0  | 60                            |
| 60                      |         |       |    | 27,0            | 67,7  | 40                            |
| 70                      |         |       |    | 23,3            | 58,2  | 40                            |

*Выводы*

1. Показана возможность достижения высокой белизны (не менее 90 %) микрокристаллической целлюлозы, полученной гидролизом газо-воздушной смесью хлористого водорода, при использовании в качестве отбеливающих агентов гипохлорита натрия или пероксида водорода.

2. Качественно отбелить можно образцы микрокристаллической целлюлозы даже с исходной белизной около 40 %.

3. Наибольшая эффективность отбеливания достигается применением гипохлорита натрия при рН отбелочного раствора 2...3 и температуре 20...25 °С.

4. Пероксид водорода позволяет добиться высокой белизны микрокристаллической целлюлозы при рН 10...11 и температуре 60 °С, однако расход активного кислорода на проведение отбеливания более чем в 3 раза выше в сравнении с расходом активного хлора.

5. Показано, что красящие вещества микрокристаллической целлюлозы, полученной методом газофазного гидролиза, состоят из двух хромофорных групп, обесцвечивающихся с различной скоростью. Легкоокисляемая группа компонентов составляет около 90 % от общего количества красящих веществ, а трудноокисляемые компоненты – около 10 % и определяют интенсивность желтого оттенка микрокристаллической целлюлозы.

6. Подобраны режимы проведения отбеливания микрокристаллической целлюлозы гипохлоритом натрия и пероксидом водорода с получением образцов, имеющих белизну, сравнимую с белизной импортных образцов микрокристаллической целлюлозы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Байдичева О.В., Хрипушин В.В., Рудакова Л.В., Рудаков О.Б. Цветометрия – новый метод контроля качества пищевой продукции // Пищевая пром-сть. 2008. № 5. С. 20–22. Baydicheva O.V., Khripushin V.V., Rudakova L.V., Rudakov O.B. Colorimetry – A New Method for Quality Control of Food Products. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 2008, no. 5, pp. 20–22.

2. Бернард В. Практика беления и крашения текстильных материалов: Механическая и химическая технология. М.: Легк. индустрия, 1971. 472 с. Bernard V. *Practice of Bleaching and Dyeing Textile Materials*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1971. 472 p.

3. Емельянова И.З. Химико-технический контроль гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 328 с. Emel'yanova I.Z. *Chemical and Engineering Control of Hydrolysis Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 328 p.

4. Зяблов А.Н., Жиброва Ю.А., Селеменов В.Ф. Цифровая обработка изображений. Достоинства и недостатки // Сорбц. и хроматограф. процессы. 2006. Т. 6, вып. 6. С. 1424–1429. Zyablov A.N., Zhibrova Yu.A., Selemenev V.F. Digital Image Processing. Advantages and Disadvantages. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy* [Sorptions and chromatography processes], 2006, vol. 6, iss. 6, pp. 1424–1429.

5. Иванов В.М., Кузнецова О.В. Химическая цветометрия: возможности метода, области применения и перспективы // Успехи химии. 2001. Т. 70, № 5. С. 411–428. Ivanov V.M., Kuznetsova O.V. Chemical Chromaticity: Potential of the Method, Scope and Prospects. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2001, vol. 70, no. 5, pp. 411–428. DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2001v070n05ABEH000636>

6. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 241 с. Krivosheyev M.I., Kustarev A.K. *Colorimetric Measurement*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 241 p.

7. Патент 2669845 РФ, МПК C08B 15/02. Способ непрерывного гидролиза для получения микрокристаллической целлюлозы: № 2018102867: заявл. 25.01.2018; опубл. 16.10.2018 / А.Ю. Лаптев, Ю.А. Лаптев, А.И. Сизов, С.Д. Пименов. Laptev A.Yu., Laptev Yu.A., Sizov A.I., Pimenov S.D. *Method of Continuous Hydrolysis for the Production of Microcrystalline Cellulose*. Patent RF no. RU 2669845 C1, 2018.

8. Рудакова Л.В., Васильева А.П., Шведов Г.И., Поплавская Б.В. Цифровые технологии для определения цветности и белизны лекарственных средств // Фармацевтические технологии и упаковка № 1. 2012. № 2(215). С. 38–40. Режим доступа: [http://www.medbusiness.ru/Images/FTU\\_1-2012\\_38-40.pdf](http://www.medbusiness.ru/Images/FTU_1-2012_38-40.pdf) (дата обращения: 08.11.21). Rudakova L.V., Vasil'yeva A.P., Shvedov G.I., Poplavskaya B.V. Digital Technologies for Determining the Color and Whiteness of Medicines. *Farmatsevticheskiye tekhnologii i upravovka № 1*, 2012, no. 2(215), pp. 38–40.

9. Сизов А., Васильев В. Инновационная технология получения микрокристаллической целлюлозы // ЛесПромИнформ, 2019. № 5(143). Режим доступа: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5391> (дата обращения: 08.11.21). Sizov A., Vasil'yev V. Innovative Technology for Producing Microcrystalline Cellulose. *LesPromInform*, 2019, no. 5(143).

10. Тамм Л.А., Чистоклетов Н.В., Платонов А.Ю. Теоретические основы химических превращений моносахаридов в процессах ЦБП. Ленинград: ЛТИЦБП, 1990. 87 с. Tamm L.A., Chistokletov V.N., Platonov A.Yu. *Theoretical Basis of Chemical Transformations of Monosaccharides in Processes of Pulp and Paper Industry*. Leningrad, LTITsBP Publ., 1990. 87 p.

11. Хакимова Ф.Х., Ковтун Т.Н. Отбелка целлюлозы. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2010. 182 с. Режим доступа: <https://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib3129> (дата обращения: 08.11.21). Khakimova F.Kh., Kovtun T.N. *Cellulose Bleaching*. Perm, PSTU Publ., 2010. 182 p.

12. Kopesky R., Tsai A.G., Ruskay T.A. *Production of Microcrystalline Cellulose*. Patent WO no. WO 2004/011501 A1, 2004.

13. Nguyen X.T. *Process for Preparing Microcrystalline Cellulose*. Patent US no. US 2004/0074615 A1, 2004.

14. Rabelo M.S., Colodette J.L., Sacon V.M., Silva M.R., Azevedo M.A.B. Molybdenum Catalyzed Acid Peroxide Bleaching of Eucalyptus Kraft Pulp. *BioResources*, 2008, vol. 3, no. 3, pp. 881–897.

15. Schaible D., Sherwood B. *Treatment of Pulp to Produce Microcrystalline Cellulose*. Patent US no. US 2005/0145351 A1, 2005.

16. Shishkin Yu.L., Dmitrienko S.G., Medvedeva O.M., Badakova S.A., Pyatkova L.N. Use of a Scanner and Digital Image-Processing Software for the Quantification of Adsorbed Substances. *Journal of Analytical Chemistry*, 2004, vol. 59, iss. 2, pp. 102–106. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JANC.0000014733.32082.4b>

17. Soldat D.J., Barak Ph., Lepore B.J. Microscale Colorimetric Analysis Using a Desktop Scanner and Automated Digital Image Analysis. *Journal of Chemical Education*, 2009, vol. 86, iss. 5, pp. 617–621. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed086p617>

18. Tian J., Wang J., Zhao S., Jiang C., Zhang X., Wang X. Hydrolysis of Cellulose by the Heteropoly Acid  $H_3PW_{12}O_{40}$ . *Cellulose*, 2010, vol. 17, pp. 587–594. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-009-9391-0>

19. Toshkov T.S., Gospodinov N.R., Vidimski E.P. *Method of Producing Microcrystalline Cellulose*. Patent US no. US 3954727 A, 1976.

20. Trusovs S. *Microcrystalline Cellulose*. Patent US no. US 6392034 B1, 2002.

21. Vanhatalo K.M., Dahl O.P. Effect of Mild Acid Hydrolysis Parameters on Properties of Microcrystalline Cellulose. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 4729–4740. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4729-4740>

УДК 676.084.2+546.57

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-184-195

## СИНТЕЗ КОЛЛОИДНОГО СЕРЕБРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ

**В.А. Плахин, аспирант;** *ResearcherID:* [AAH-6544-2020](https://orcid.org/0000-0001-9143-1663),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9143-1663>

**Ю.Г. Хабаров, д-р хим. наук, проф.;** *ResearcherID:* [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

**В.А. Вешняков, канд. хим. наук;** *ResearcherID:* [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.plahin@narfu.ru, khabarov.yu@mail.ru, viacheslav.veshnyakov@mail.ru

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 01.10.20 / Принята к печати 13.12.20

**Аннотация.** Коллоидные растворы серебра могут быть использованы как катализаторы при проведении различных химических превращений органических веществ и для решения проблем утилизации токсичных соединений, а также в качестве антибактериальных средств, при изготовлении смазочных и светопоглощающих материалов, покрытий, датчиков, проводящих паст, высокоэффективных электродных материалов. Цель работы – исследование синтеза коллоидного серебра с использованием в качестве стабилизатора раствора лигносульфонатов. Коллоидное серебро синтезировали после проводимой при 100 °С окислительно-восстановительной реакции катионов Ag(I) с глюкозой в присутствии лигносульфонатов в щелочной среде, которая обеспечивается добавкой аммиачной воды. Для контроля синтеза коллоидного серебра использована электронная спектроскопия. После проведения реакции раствор окрашивается в темно-коричневый цвет, а на электронных спектрах появляется интенсивная полоса поглощения с максимумом в области 400 нм. Изучено влияние расхода реагентов и продолжительности синтеза. Установлено, что оптимальный расход реагентов при синтезе коллоидного серебра следующий: 2,5...5 г глюкозы / г Ag, 0,3...1 г лигносульфонатов / г Ag и 3...5 г NH<sub>3</sub> / г Ag. Продолжительность синтеза – 2...5 мин. Образующийся коллоидный раствор серебра устойчив в течение нескольких месяцев. Отмечено, что при его хранении происходит частичное расслоение без выделения осадка. Экспериментально показано сопровождение расслоения перераспределением частиц коллоидного серебра. С помощью электронной спектроскопии выявлено отсутствие в верхнем слое частиц коллоидного серебра. Изучена кинетика реакции в экспериментах, проведенных в термостатируемых условиях при температурах от 50 до 100 °С. Кинетическая зависимость описывается уравнением первого порядка на начальном этапе реакции, длительность которого зависит от температуры. Продолжительность активного участка кинетической кривой составляет 15...90 % от общего времени реакции. Доказано, что на активном участке логарифм константы скорости линейно зависит от обратной термодинамической температуры (коэффициент парной корреляции – 0,9887). Энергия активации составила 47 кДж/моль.

**Для цитирования:** Плахин В.А., Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А. Синтез коллоидного серебра с использованием лигносульфонатов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 184–195. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-184-195

*Ключевые слова:* коллоидное серебро, лигносульфонаты, реакция восстановления, коллоидные растворы, глюкоза.

## SYNTHESIS OF COLLOIDAL SILVER USING LIGNOSULFONATES

*Vadim A. Plakhin*, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAH-6544-2020](https://orcid.org/0000-0001-9143-1663),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9143-1663>

*Yuriy G. Khabarov*, Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

*Viacheslav A. Veshnyakov*, Candidate of Chemistry; ResearcherID: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: [v.plahin@narfu.ru](mailto:v.plahin@narfu.ru), [khabarov.yu@mail.ru](mailto:khabarov.yu@mail.ru), [viacheslav.veshnyakov@mail.ru](mailto:viacheslav.veshnyakov@mail.ru)

**Original article** / Received on October 1, 2020 / Accepted on December 13, 2020

**Abstract.** Colloidal silver solutions can be used as catalysts for carrying out various chemical transformations of organic substances and solving the problems of disposal of toxic compounds, as well as antibacterial agents for combating pathogenic microflora, in the manufacture of lubricants and light-absorbing materials, coatings, sensors, conductive pastes, and high-performance electrode materials. The research purpose is to study the synthesis of colloidal silver using a solution of technical lignosulfonates (LST) as a stabilizer. Colloidal silver was synthesized as a result of the reduction-oxidation (redox) reaction of Ag(I) cations with glucose at 100 °C in the presence of lignosulfonates. The reaction was carried out in an alkaline medium, which is provided by the addition of ammonia water. Electronic spectroscopy was used to control the synthesis of colloidal silver. After the reaction, the solution turned dark brown and an intense absorption band with a maximum at 400 nm appeared on the electron spectra. The effects of reagent consumption and synthesis duration were studied. It was found that the optimal reagent consumption in the colloidal silver synthesis is as follows: 2.5–5 g glucose / g Ag, 0.3–1 g LST / g Ag, and 3–5 g NH<sub>3</sub> / g Ag. The synthesis duration is 2–5 min. The resulting colloidal silver solution is stable for several months. Partial stratification without precipitation is observed during the solution storage. It is shown experimentally that the stratification is followed by a redistribution of colloidal silver particles. Electron spectroscopy confirmed the absence of colloidal silver particles in the upper layer. The reaction kinetics has been studied in experiments carried out under thermostatically controlled conditions at temperatures from 50 to 100 °C. The kinetic dependence is described by a first-order equation at the initial stage of the reaction, the duration of which depends on the temperature. The duration of the active part of the kinetic curves is 15–90 % of the total reaction time. The logarithm of the rate constant on the active section was proved to depend linearly on the reverse thermodynamic temperature (pair correlation coefficient is 0.9887). The activation energy was 47 kJ/mol.

**For citation:** Plakhin V.A., Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A. Synthesis of Colloidal Silver Using Lignosulfonates. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 184–195. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-184-195

*Keywords:* nanosilver, lignosulfonates, reduction reaction, colloidal solutions, glucose.

### Введение

Коллоидные растворы благородных металлов обладают каталитическими и биоцидными свойствами. Известно использование их в качестве катализаторов для проведения различных превращений органических соединений, а также для борьбы с патогенной микрофлорой [16, 17]. Кроме того, наносеребро перспективно при изготовлении смазочных и светопоглощающих материалов, покрытий, датчиков, проводящих паст, высокоэффективных электродных материалов и т. д. [13]. Для стабилизации частиц наносеребра используют различные соединения, в т. ч. и высокомолекулярные (поливинилпирролидон, поливиниловый спирт и др.). Из всех видов лигнинов только лигносульфонаты являются водорастворимыми в широком диапазоне pH, т. к. их макромолекулы содержат гидрофильные  $\text{SO}_3\text{H}$ -группы. Технические лигнины, в т. ч. и лигносульфонаты, – это недорогие, нетоксичные, биоразлагаемые и биосовместимые продукты, образующиеся в результате химической и биохимической переработки растительной биомассы. Их выпуск как коммерческого продукта не превышает 2 % от общего количества получаемых при химической переработке растительной биомассы технических лигнинов. Лигносульфонаты используют в качестве диспергаторов и добавок для бетона, пылеподавляющих средств, флокулянтов, добавок в свинцово-кислотных аккумуляторных батареях, компонентов композитов и ионообменных смол, в медицине и косметологии [11].

Основным методом синтеза коллоидного серебра является восстановление катионов  $\text{Ag(I)}$  с помощью различных восстановителей. Примеры работ, в которых описаны результаты синтеза коллоидного серебра, приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные методы синтеза коллоидных растворов серебра с помощью реакции восстановления

| Краткое описание  | Источник |
|---|----------|
| Синтез проводят в течение 60 с в микроволновой печи путем восстановления $\text{Ag(I)}$ с помощью D-глюкозы. Для стабилизации золя используют водные дисперсии крахмала. Средний размер наночастиц серебра – 5,9 нм   | [14]     |
| Однородные сферические наночастицы серебра со средним диаметром 50 нм получают путем восстановления нитрата серебра глюкозой при температуре 50...70 °С. В качестве стабилизатора применяют поливинилпирролидон   | [6]      |
| Синтез золя серебра основан на восстановлении катионов $\text{Ag(I)}$ D-глюкозой при использовании полиэтиленгликоля как стабилизатора. В зависимости от времени перемешивания при 45 °С (3, 6, 24 и 48 ч) получают наночастицы серебра сферической формы со средним диаметром 10, 11, 15 и 25 нм соответственно            | [15]     |
| Золь сферических наночастиц серебра размером 20 нм получают, используя в качестве восстановителей борогидрид натрия, этиловый спирт и аскорбиновую кислоту, а в качестве стабилизатора – лигносульфонаты. Реакционную смесь перемешивают в течение 1 ч. При этом образуются коллоидные системы, стабильные в течение 6 мес. | [3]      |

Окончание табл. 1

| Краткое описание  | Источник |
|---|----------|
| Пасту, содержащую наночастицы серебра, получают под действием ультразвука, восстанавливая ионы серебра борогидридом натрия в присутствии высокомолекулярных стабилизаторов, состоящих из сульфированных лигносульфонатов и крахмала. Для очистки смесь обрабатывают ферментом, разлагающим лигнин, а для гидролиза крахмала до D-глюкозы – серной кислотой            | [5]      |
| Коллоидные системы, содержащие наночастицы серебра с преимущественно сферической формой, получают, выдерживая раствор лигносульфонатов и соли серебра в течение 7 сут   | [12]     |
| В качестве восстановителя для получения стабильных коллоидов наночастиц серебра со средним размером 41 нм использовали лигносульфонаты. Продолжительность реакции при комнатной температуре достигает 10 сут  | [10]     |
| Гидрогель, содержащий высокостабильные и однородно диспергированные наночастицы серебра сферической формы с диаметром около 10 нм, получают восстановлением ионов серебра борогидридом натрия в водной дисперсии микрогидрогеля сульфированных лигносульфонатов   | [18]     |
| Композитные системы с широким диапазоном диаметров частиц (от 35 нм до 6000 нм), состоящие из наночастиц серебра, осажденных на органически модифицированном диоксиде кремния, получают смешением растворенного в органическом растворителе (1,4-диоксан, ацетон или N, N-диметилформамид) диоксида кремния с лигносульфонатами и аммиачным раствором нитрата серебра | [9]      |
| Наночастицы серебра сферической формы со средним диаметром 10 нм получают из нитрата серебра, используя в качестве восстановителя смесь, состоящую из 50 % альгиновой кислоты и 50 % лигносульфонатов. Синтез проводят при перемешивании в течение 72 ч   | [4]      |
| Стабильный коллоидный раствор серебра, полученный по окислительно-восстановительной реакции катионов серебра с катионами Fe(II), обладает магнитной активностью. В качестве стабилизатора использованы лигносульфонаты. Размер выделенных частиц Ag@Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> достигает 5 мкм. При хранении со временем происходит пептизация коллоидных частиц  | [1]      |
| Гидрогель, содержащий наночастицы серебра со средним диаметром 20 нм, получают, используя в качестве стабилизатора аминированные лигносульфонаты  | [8]      |
| Стабильные коллоиды серебра с диаметром частиц преимущественно 5–30 нм получают, используя декстрин в качестве восстанавливающего и стабилизирующего агента. Продолжительность реакции при комнатной температуре достигает 7 сут  | [7]      |

Цель исследования – разработка быстрого метода синтеза коллоидного раствора серебра за счет окислительно-восстановительной реакции катионов Ag(I) с глюкозой в присутствии лигносульфонатов в водно-аммиачной среде.

### Объекты и методы исследования

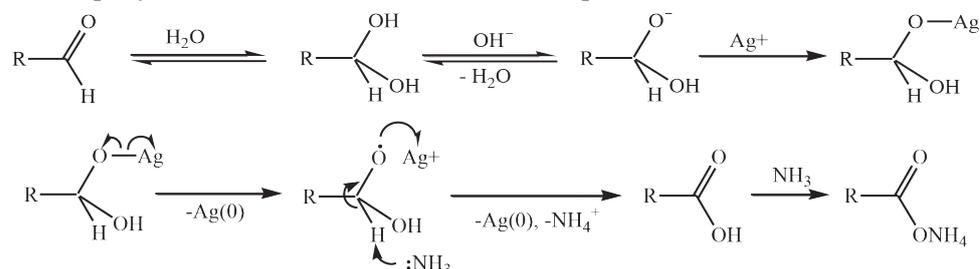
**Реактивы и материалы.** В экспериментах использованы нитрат серебра (ч.д.а), D-глюкоза (ч.д.а), 14 %-й водный раствор аммиака (ос.ч.), технические лигносульфонаты натрия марки Т (ЛСТ) от сульфитной варки еловой древесины.

**Методика синтеза коллоидного раствора серебра.** В мерной пробирке вместимостью 25 мл смешивали растворы глюкозы (18 мг/мл), ЛСТ (20 мг/мл) и нитрата серебра (10,8 мг Ag/мл). Затем для подщелачивания в пробирку приливали водный 14 %-й раствор аммиака и нагревали ее на кипящей водяной бане в течение заданного времени. После чего реакцию смесь охлаждали, объем раствора доводили до 25 мл дистиллированной водой.

**Методика определения оптической плотности и регистрации электронных спектров.** Оптическую плотность измеряли на фотометре КФК-3 в кювете с толщиной рабочего слоя 10 мм при длине волны 400 нм. Регистрацию электронных спектров производили на спектрофотометре Shimadzu UV-1650PC в области длин волн 360...700 нм, используя кварцевые кюветы с толщиной рабочего слоя 10 мм, относительно дистиллированной воды. Перед определением оптической плотности и регистрацией спектров исходные растворы разбавляли в 50 раз.

### Результаты исследования и их обсуждение

Образование частиц коллоидного серебра происходит в результате окислительно-восстановительных превращений и дальнейшей агрегации атомов серебра в наноразмерные частицы. В зависимости от восстановителя редокс-реакция протекает по различным механизмам [2]. Например, в работе [18] предполагается, что механизм восстановления Ag(I) глюкозой в щелочной среде осуществляется через гидратацию альдегидной группы с образованием геминального диола, который в дальнейшем ионизируется в щелочной среде и вступает в реакцию с катионами серебра. Далее в серебряном производном происходят внутримолекулярный перенос электрона с атома кислорода на катион серебра и отщепление протона от атома углерода с образованием карбоксильной группы. Так как среда проведения редокс-реакции щелочная, то в конечном итоге продуктом является аммониевая соль карбоновой кислоты:



Кроме того, процесс, по-видимому, может проходить через стадию енолизации молекулы глюкозы с последующим взаимодействием аминоккомплекса Ag(I) с  $\pi$ -электронами ендиола и переносом электрона на катион серебра.

Из литературы известен способ получения раствора коллоидного серебра с использованием глюкозы в качестве восстановителя, реакция проходит в нейтральной среде [14]. При попытке воспроизвести результаты этих исследований

мы обнаружили, что в условиях синтеза затрачивается только незначительная часть катионов серебра. Нами предложен метод, в котором катионы серебра используются полностью. Он заключается в термической обработке водно-аммиачного раствора, содержащего катионы серебра, глюкозу и лигносульфонаты.

Для оценки воспроизводимости были проведены синтезы (повторность – 3), представленные в табл. 2 данные свидетельствуют о хорошей воспроизводимости результатов получения растворов коллоидного серебра.

Таблица 2

**Воспроизводимость результатов синтеза растворов коллоидного серебра**

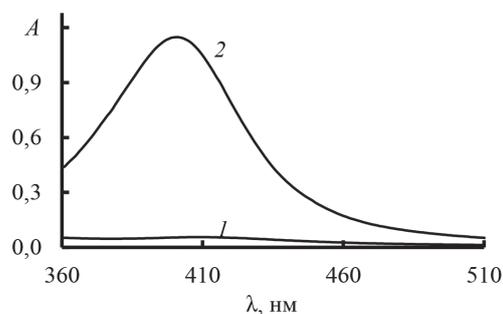
| $\tau$ ,<br>мин | Объем растворов,<br>мл |                   | Оптическая плотность при 400 нм |       |       |                 | Коэффициент вариации,<br>% |
|-----------------|------------------------|-------------------|---------------------------------|-------|-------|-----------------|----------------------------|
|                 | Глюкоза                | AgNO <sub>3</sub> | $A_1$                           | $A_2$ | $A_3$ | $A_{\text{ср}}$ |                            |
| 2               | 5                      | 1                 | 1,885                           | 1,799 | 1,887 | 1,857           | 2,7                        |
| 5               |                        |                   | 1,901                           | 1,902 | 1,866 | 1,890           | 1,1                        |
| 2               |                        | 0,5               | 0,958                           | 0,955 | 0,953 | 0,955           | 0,3                        |
|                 |                        | 3                 | 1                               | 1,878 | 1,874 | 1,862           | 1,871                      |

Примечание: Объем раствора (мл): ЛСТ – 1, аммиачная вода – 0,5;  $\tau$  – продолжительность синтеза.

Контроль образования коллоидного серебра проводили по величине оптической плотности раствора при длине волны 400 нм. Из электронных спектров, показанных на рис. 1, следует, что спектр щелочного раствора ЛСТ представляет собой ниспадающую линию, а на спектре щелочного раствора коллоидного серебра наблюдается интенсивный максимум поглощения при 400 нм. Этот спектр (кривая 2) аналогичен электронным спектрам коллоидного серебра, приведенным в [4, 19].

Рис. 1. Электронные спектры щелочного раствора ЛСТ (1) и синтезированного раствора коллоидного серебра (2). Концентрации в фотометрируемых растворах: 3,5 мг Ag/л и 6,4 мг ЛСТ/л

Fig. 1. Electronic spectra of the LST alkaline solution (1) and the synthesized colloidal silver solution (2). Concentrations in the photometric solutions: 3.5 mg Ag/L and 6.4 mg LST/L



При разработке метода синтеза изучено влияние продолжительности процесса и расхода реагентов на образование коллоидного серебра.

*Влияние продолжительности синтеза.* Синтез проводили при следующих расходах растворов реагентов: 5 мл раствора глюкозы, 1 мл раствора ЛСТ, 1 мл раствора нитрата серебра и 1,5 мл аммиачной воды. Через заданные промежутки времени в мерную колбу вместимостью 25 мл отбирали 0,2 мл реакционной смеси, объем раствора доводили до метки дистиллированной водой и регистрировали электронные спектры. Результаты приведены на рис. 2 в виде зависимости оптической плотности при 400 нм от продолжительности синтеза. Как видно, через 1 мин происходит быстрое увеличение оптической плотно-

сти до предельного значения, которое в дальнейшем практически не меняется. Первоначальный период незначительного увеличения оптической плотности обусловлен тем, что за это время реакционная смесь нагревается до 100 °С.

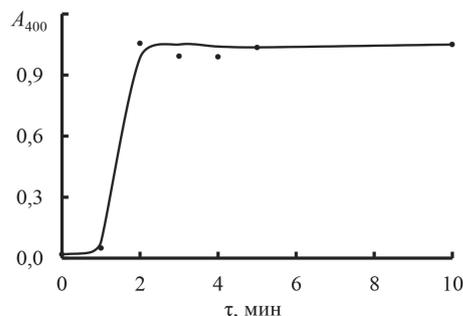
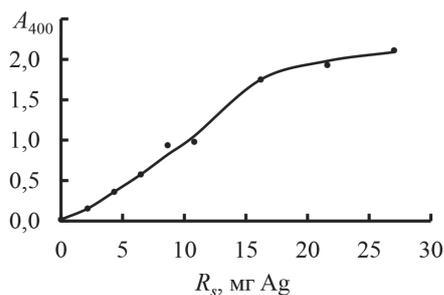


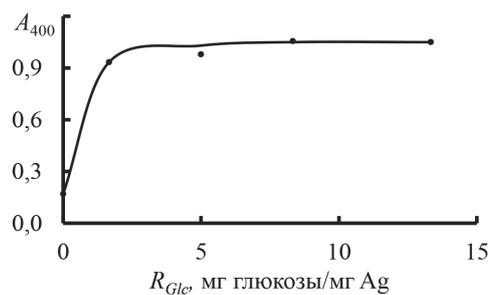
Рис. 2. Влияние продолжительности синтеза на оптическую плотность раствора коллоидного серебра при 400 нм

Fig. 2. Influence of the reaction duration ( $\tau$ ) on the absorbance of the colloidal silver solution at 400 nm

*Влияние расхода нитрата серебра.* Синтез проводили на кипящей водяной бане в течение 2 мин при постоянных расходах растворов глюкозы (5 мл), ЛСТ (1 мл), аммиачной воды (1,5 мл). Объем раствора  $\text{AgNO}_3$  изменяли от 0 до 2 мл. Полученные результаты приведены на рис. 3, а. При небольших расходах оптическая плотность при 400 нм линейно увеличивается, при расходе серебра более 15 мг рост  $A_{400}$  замедляется.



а



б

Рис. 3. Влияние расхода серебра ( $R_s$ , а) и глюкозы ( $R_{Glc}$ , б) на оптическую плотность раствора коллоидного серебра при 400 нм

Fig. 3. Influence of the consumptions of silver ( $R_s$ , а) and glucose ( $R_{Glc}$ , б) on the absorbance of the colloidal silver solution at 400 nm

*Влияние расхода глюкозы.* Синтез проводили на кипящей водяной бане в течение 2 мин при постоянных расходах растворов  $\text{AgNO}_3$  (1 мл), ЛСТ (1 мл), аммиачной воды (1,5 мл). Объем раствора глюкозы изменяли от 0 до 8 мл. Результаты показаны на рис. 3, б. Как видно из рисунка, для синтеза коллоидного серебра достаточен расход 2 мг глюкозы / мг Ag, что примерно соответствует мольному соотношению 1:1.

*Влияние расхода лигносульфонатов.* В отличие от других видов технических лигнинов в молекулах лигносульфонатов имеются алифатические сульфогруппы, благодаря которым лигносульфоновые кислоты проявляют сильные кислотные свойства и являются растворимыми в водной среде в широком диапазоне pH. Кроме того, увеличивается полярность макромолекул и повышается их поверхностная активность. Стабилизация коллоидных растворов серебра, скорее всего, во многом определяется именно ей. Влияние расхода лигносульфонатов оценено в экспериментах, в которых изменяли расход ЛСТ. Синтез

проводили на кипящей водяной бане в течение 2 мин при постоянных расходах растворов глюкозы (3 мл),  $\text{AgNO}_3$  (1 мл), аммиачной воды (1,5 мл). Объем раствора ЛСТ изменяли от 0 до 1,5 мл. Полученные данные представлены на рис. 4, а, при этом значения оптических плотностей приведены за вычетом собственного поглощения ЛСТ. Как и в опытах с различными расходами глюкозы, зависимость оптической плотности  $A_{400}$  от расхода ЛСТ аналогична зависимости, приведенной на рис. 3, б: после быстрого роста оптическая плотность выходит на плато. Без добавления ЛСТ окислительно-восстановительная реакция приводит к выделению серебра в виде серебряного зеркала. Оказалось, что при малом расходе ЛСТ (0,37 мг ЛСТ/мг Ag) образуется неустойчивая серо-коричневая коллоидная система, которая расслаивается с выделением темно-серого осадка. Расход ЛСТ на синтез коллоидного раствора серебра должен быть не менее 0,5 мг ЛСТ/мг Ag.

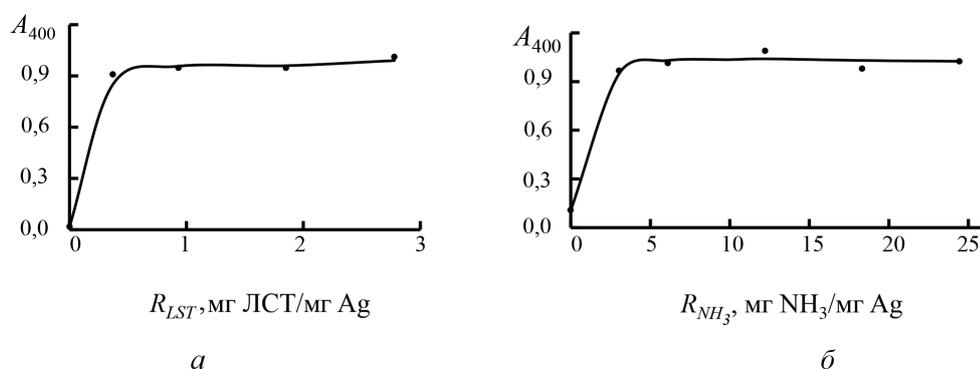


Рис. 4. Влияние расхода ЛСТ ( $R_{LST}$ , а) и аммиачной воды ( $R_{NH_3}$ , б) на оптическую плотность раствора коллоидного серебра при 400 нм

Fig. 4. Influence of the consumptions of LST ( $R_{LST}$ , а) and ammonia water ( $R_{NH_3}$ , б) on the absorbance of the colloidal silver solution at 400 nm

*Влияние расхода аммиачной воды.* Синтез проводили на кипящей водяной бане в течение 2 мин при постоянных расходах растворов глюкозы (3 мл),  $\text{AgNO}_3$  (1 мл), ЛСТ (1 мл). Объем аммиачной воды изменяли от 0 до 2 мл. Результаты приведены на рис. 4, б. Как в опытах с различными расходами глюкозы, после быстрого роста оптической плотности зависимость выходит на плато. Оптимальный расход аммиачной воды на синтез коллоидного раствора серебра составляет 3...5 мг  $\text{NH}_3$ /мг Ag.

В большинстве случаев образуются стабильные в течение длительного времени растворы, окрашенные в желто-коричневый цвет. При их хранении не выделяется осадок, а происходит частичное расслоение коллоидного раствора с образованием светлого верхнего и темного нижнего слоев. Для изучения данного процесса был проведен опыт, в ходе которого синтезированные растворы хранили в течение месяца, периодически измеряя объем нижнего слоя (рис. 5). Повторность опыта – 2, средний коэффициент вариации – 1,0 %. После завершения опыта записаны электронные спектры верхнего и нижнего слоев (рис. 6). Оказалось, что на спектре верхнего слоя отсутствует полоса поглощения при 400 нм, что свидетельствует о перераспределении дисперсных наночастиц серебра по высоте золь без осаждения в виде крупнодисперсного осадка.

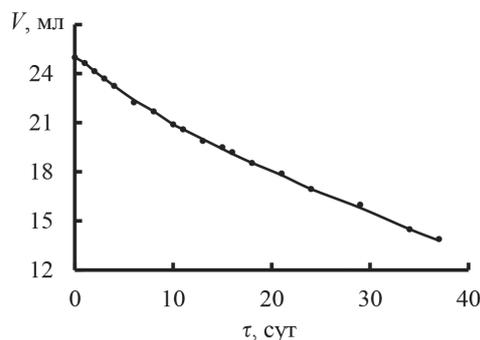


Рис. 5. Зависимость объема нижнего слоя раствора коллоидного серебра от продолжительности хранения

Fig. 5. Dependence of the volume of the lower layer of the colloidal silver solution on the storage duration

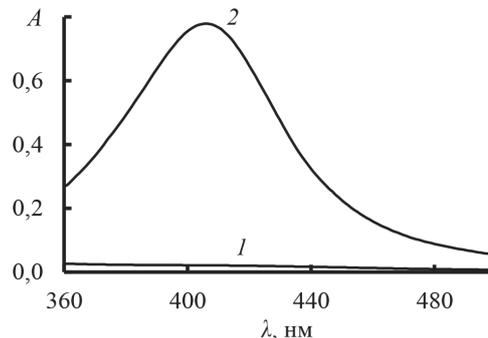


Рис. 6. Электронные спектры верхнего (1) и нижнего (2) слоев раствора коллоидного серебра

Fig. 6. Electronic spectra of the upper (1) and lower (2) layers of the colloidal silver solution

Протекающие химические процессы можно представить в виде последовательных реакций восстановления катионов серебра и формирования частиц металлического серебра. Общий итог определяется соотношением скоростей реакций этих стадий. Для изучения кинетики фотометрической реакции были проведены эксперименты в термостатируемых условиях при температурах от 50 до 100 °С. В зависимости от температуры продолжительность реакции составляла 15...120 мин. Результаты, представленные на рис. 7, свидетельствуют о значительном влиянии температуры на скорость процесса.

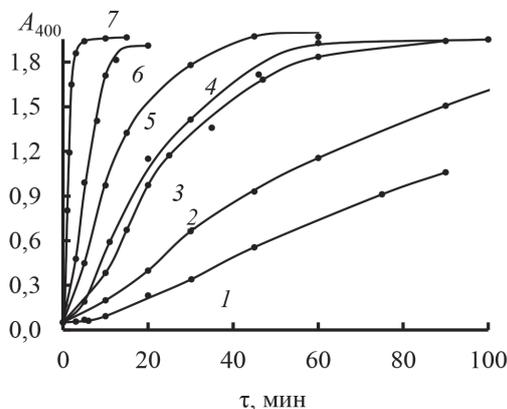


Рис. 7. Изменение оптической плотности раствора при 400 нм с течением реакции при различных температурах: 50 (1); 55 (2); 60 (3); 65 (4); 70 (5); 80 (6); 100 °С (7)

Fig. 7. Change in absorbance of the solution at 400 nm with the course of reaction at different temperatures: 50 (1); 55 (2); 60 (3); 65 (4); 70 (5); 80 (6); 100 °C (7)

Чтобы обработать кинетические данные, оптические плотности растворов пересчитаны в концентрации катионов серебра. Для этого проведена серия опытов с осуществлением изменения концентрации серебра. Повторность каждого опыта равнялась 2. Фотометрическая реакция хорошо воспроизводится, коэффициент вариации составил 0,9 %. Уравнение градуировочной зависимости представляет собой полином первого порядка:  $C_{Ag(I)} = 0,1213A_{400} + 0,0453$ , коэффициент парной корреляции  $R^2 = 0,9955$ . На основе полученных зависимостей были построены полулогарифмические анаморфозы ( $\ln C_{Ag(I)} = at + b$ ), коэффициенты уравнений которых приведены в табл. 3. Значения коэффициента

парной корреляции свидетельствуют о линейной зависимости. Линейность соблюдается не на всем временном диапазоне и зависит от температуры (табл. 3).

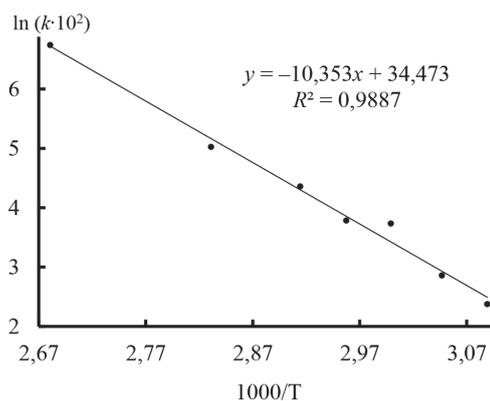
Таблица 3

**Результаты определения кинетических параметров реакции образования коллоидного серебра при различных температурах**

| Температура проведения реакции, К | Коэффициенты уравнения |       | $R^2$ | Продолжительность, мин |  |
|-----------------------------------|------------------------|-------|-------|------------------------|--|
|                                   | $a$                    | $b$   |       | реакции                | линейного участка полулогарифмической анаморфозы |
| 324                               | -0,11                  | 17,76 | 0,998 | 90                     | 90   |
| 328                               | -0,17                  | 17,47 | 0,990 | 120                    | 60   |
| 333                               | -0,42                  | 17,73 | 0,985 | 90                     | 25   |
| 338                               | -0,44                  | 17,42 | 0,975 | 100                    | 30   |
| 343                               | -0,78                  | 17,31 | 0,995 | 60                     | 15   |
| 353                               | -1,52                  | 17,32 | 0,991 | 20                     | 10   |
| 373                               | -8,45                  | 19,49 | 0,997 | 15                     | 2  |

Рис. 8. Зависимость логарифма константы скорости реакции от обратной термодинамической температуры

Fig. 8. Dependence of the logarithm of the reaction rate constant on the reverse thermodynamic temperature



Для определения энергии активации построена зависимость логарифма константы скорости реакции от обратной термодинамической температуры (рис. 8). Зависимость хорошо описывается полиномом первой степени  $\ln(k \cdot 10^2) = -10,353[C_{Ag(I)}] + 34,473$ ;  $R^2 = 0,99$ . Энергия активации составила 47 кДж/моль.

### Заключение

Таким образом, разработан быстрый метод синтеза коллоидного раствора серебра за счет окислительно-восстановительной реакции  $Ag(I)$  с глюкозой в водно-аммиачной среде. В качестве высокомолекулярного стабилизатора коллоидного раствора серебра использованы лигносульфонаты. Определены оптимальные расходы реагентов при синтезе коллоидного серебра: 2,5...5 г глюкозы, 0,3...1 г ЛСТ и 3...5 г  $NH_3$  / г  $Ag$ . Продолжительность синтеза – 2...5 мин. Образующиеся коллоидные растворы являются стабильными в течение нескольких месяцев. Наблюдается частичное перераспределение дисперсных наночастиц серебра по высоте золь без осаждения в виде крупнодисперсного

осадка. Кинетика реакции образования коллоидного серебра изучена при температурах 50...100 °С. Кинетическая зависимость описывается уравнением первого порядка на начальном этапе реакции, продолжительность которого зависит от температуры и составляет 15...90 % от общего времени реакции. Энергия активации реакции образования коллоидного серебра – 47 кДж/моль.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Плахин В.А., Вешняков В.А., Хабаров Ю.Г., Чухчин Д.Г. Свойства продуктов взаимодействия катионов железа(II) с аммиаком серебра в присутствии лигносульфонатов // Физикохимия растительных полимеров: материалы VIII междунар. конф. Архангельск: САФУ. 2019. С. 114–117. Plakhin V.A., Veshnyakov V.A., Khabarov Yu.G., Chukhchin D.G. Properties of the Products of Interaction of Iron(II) Cations with Silver Ammonia in the Presence of Lignosulfonates. Proceedings of the VIII International Conference “Physicochemistry of Plant Polymers”. Arkhangelsk, NArFU, 2019, pp. 114–117.
2. Benet W.E., Lewis G.S., Yang L.Z., Hughes D.E.P. The Mechanism of the Reaction of the Tollens Reagent. *Journal of Chemical Research*, 2011, vol. 35, no. 12, pp. 675–677. DOI: <https://doi.org/10.3184/174751911X13206824040536>
3. Chen L., Xiang Y. *Preparation Method for Lignosulfonate Nano-Silver Colloid*. Patent CN no. CN 102489716 B, 2012.
4. Dumitriu R.P., Niță L.E., Sacarescu L., Vasilescu D.S. Preparation of Silver Nanoparticle Dispersion by a Green Synthesis Method. *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series B: Chemistry and Materials Science*, 2015, vol. 77, iss. 2, pp. 81–90.
5. Jiang M., Liu J., Zhu C. *A Kind of Preparation Method of High-Purity Nano Silver Paste*. Patent CN no. CN 108620604 A, 2018.
6. Kheybari S., Samadi N., Hosseini S.V., Fazeli A., Fazeli M.R. Synthesis and Antimicrobial Effects of Silver Nanoparticles Produced by Chemical Reduction Method. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2010, vol. 18, iss. 3, pp. 168–172.
7. Konował E., Sybis M., Modrzejewska-Sikorska A., Milczarek G. Synthesis of Dextrin-Stabilized Colloidal Silver Nanoparticles and Their Application as Modifiers of Cement Mortar. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, vol. 104, pp. 165–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.011>
8. Li M., Jiang X., Wang D., Xu Z., Yang M. In situ Reduction of Silver Nanoparticles in the Lignin Based Hydrogel for Enhanced Antibacterial Application. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, vol. 177, pp. 370–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.02.029>
9. Milczarek G., Motylenko M., Modrzejewska-Sikorska A., Klapiszewski Ł., Wysokowski M., Bazhenov V.V., Piasecki A., Konował E., Ehrlich H., Jesionowski T. Deposition of Silver Nanoparticles on Organically-Modified Silica in the Presence of Lignosulfonate. *RSC Advances*, 2014, vol. 4, no. 94, pp. 52476–52484. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4RA08418G>
10. Milczarek G., Rebis T., Fabianska J. One-Step Synthesis of Lignosulfonate-Stabilized Silver Nanoparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, vol. 105, pp. 335–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.01.010>
11. Mimini V., Kabrelian V., Fackler K., Hettegger H., Potthast A., Rosenau T. Lignin-Based Foams as Insulation Materials: A Review. *Holzforschung*, 2018, vol. 73, iss. 1, pp. 117–130. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0111>
12. Modrzejewska-Sikorska A., Konował E., Cichy A., Nowicki M., Jesionowski T., Milczarek G. The Effect of Silver Salts and Lignosulfonates in the Synthesis of Lignosulfonate-Stabilized Silver Nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, vol. 240, pp. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.05.065>

13. Natsuki J., Natsuki T., Hashimoto Y. A Review of Silver Nanoparticles: Synthesis Methods, Properties and Applications. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2015, vol. 4, iss. 5, pp. 325–332. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20150405.17>
14. Raveendran P., Fu J., Wallen S.L. A Simple and “Green” Method for the Synthesis of Au, Ag, and Au-Ag Alloy Nanoparticles. *Green Chemistry*, 2006, vol. 8, iss. 1, pp. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.1039/B512540E>
15. Shameli K., Bin Ahmad M., Jazayeri S.D., Sedaghat S., Shabanzadeh P., Jahangirian H., Mahdavi M., Abdollahi Y. Synthesis and Characterization of Polyethylene Glycol Mediated Silver Nanoparticles by the Green Method. *International Journal of Molecular Sciences*, 2012, vol. 13, iss. 6, pp. 6639–6650. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms13066639>
16. Sybis M., Konowal E., Modrzejewska-Sikorska A. Bakteriobójcza aktywność koloidów srebra stabilizowanych hydrolizatami skrobiowymi oraz ich wpływ na wytrzymałość zapraw cementowych. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.22630/ASPA.2017.16.4.04>
17. Wang Y., Li Z., Yang D., Qiu X., Xie Y., Zhang X. Microwave-Mediated Fabrication of Silver Nanoparticles Incorporated Lignin-Based Composites with Enhanced Antibacterial Activity via Electrostatic Capture Effect. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, vol. 583, pp. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.09.027>
18. Xiang Y., Xu W., Zhan Y., Xia X., Xiong Y., Xiong Y., Chen L. Preparation of Modified Sodium Lignosulfonate Hydrogel–Silver Nanocomposites. *Polymer Composites*, 2013, vol. 34, iss. 6, pp. 860–866. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.22490>
19. Xue Y., Qiu X., Liu Z., Li Y. Facile and Efficient Synthesis of Silver Nanoparticles Based on Biorefinery Wood Lignin and Its Application as the Optical Sensor. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, vol. 6, iss. 6, pp. 7695–7703. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00578>

УДК 676.085.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-196-205

## АНАЛИЗ МИЦЕЛЛООБРАЗОВАНИЯ И АДсорбЦИОННЫХ СЛОЕВ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ КОМПОНЕНТОВ СУЛЬФАТНОГО МЫЛА

*О.С. Якубова, аспирант; ResearcherID: [P-5570-2019](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7947-7068>*

*Е.Ю. Демьянцева, канд. хим. наук, доц.; ResearcherID: [P-5165-2019](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9570-1827>*

*Р.А. Смит, ст. преп.; ResearcherID: [O-2661-2019](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9665-4636>*

*В.К. Дубовый, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [W-1235-2017](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>*

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;

e-mail: [ilonichka3377@mail.ru](mailto:ilonichka3377@mail.ru), [demyantseva@mail.ru](mailto:demyantseva@mail.ru), [zz1234567@yandex.ru](mailto:zz1234567@yandex.ru)

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 23.04.20 / Принята к печати 18.06.20

---

**Аннотация.** В настоящее время одним из направлений развития целлюлозно-бумажной промышленности является био-рефайнинг, основанный на комплексной и глубокой переработке древесного сырья с получением продуктов, имеющих высокую добавленную стоимость, при сокращении количества отходов. В число актуальных задач био-рефайнинга входит усовершенствование технологии выделения вторичных продуктов (сульфатного мыла) из отработанных щелоков с увеличением выхода, качества получаемого продукта и снижением загрязнения окружающей среды. Сложность и энергоемкость процесса извлечения сульфатного мыла из отработанных щелоков обуславливается многими факторами, в т. ч. породой, используемой для варки древесины, составом экстрактивных веществ, способом подготовки древесины к делигнификации. Сульфатное мыло, выделяемое в основном отстаиванием из черного щелока, представляет собой многокомпонентную эмульсию, в составе которой преобладают смоляные и жирные кислоты, а также содержится небольшое количество неомыляемых веществ и примесь лигнина. Низкая степень извлечения связана и с отсутствием систематизированных данных о взаимном влиянии компонентов сульфатного мыла. Установлены закономерности межмолекулярного взаимодействия индивидуальных компонентов вторичного продукта – сульфатного мыла. Методами кондуктометрии и тензиометрии определены критические концентрации мицеллообразования и депрессия поверхностного натяжения растворов поверхностно-активных олеата натрия, абиетата натрия и их смесей вариативного состава. С использованием псевдофазной модели Рубина–Розена проведен детальный анализ смешанных мицелл и адсорбционных слоев. Объяснены механизмы взаимодействия компонентов в смесях. В смешанных растворах обнаружено превалирование влияния более поверхностно-активного олеата натрия на состав мицелл и адсорбционных слоев. Однако максимальный синергетический эффект мицеллообразования в смесях наблюдается при преимущественном содержании абиетата натрия. Анализ экспериментальных данных и результат моделирования сульфатного мыла позволили объяснить сложность его извлечения из щелоков после варки древесины с присутствием листовых пород в количестве более 30 %: причина – сниженное содержание смоляных кислот в черном щелоке.

**Для цитирования:** Якубова О.С., Демьянцева Е.Ю., Смит Р.А., Дубовый В.К. Анализ мицеллообразования и адсорбционных слоев бинарных смесей компонентов сульфатного мыла // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 196–205. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-196-205

**Ключевые слова:** сульфатное мыло, черный шелок, олеат натрия, абиеат натрия, псевдофазная модель Рубина–Розена.

## ANALYSIS OF MICELLE FORMATION AND ADSORPTION LAYERS OF BINARY MIXTURES OF SULPHATE SOAP COMPONENTS

**Olga S. Yakubova**, Postgraduate Student; ResearcherID: [P-5570-2019](https://orcid.org/0000-0002-7947-7068),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7947-7068>

**Elena Yu. Demiantseva**, Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-5165-2019](https://orcid.org/0000-0001-9570-1827),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9570-1827>

**Regina A. Smit**, Senior Lecturer; ResearcherID: [O-2661-2019](https://orcid.org/0000-0002-9665-4636),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9665-4636>

**Vladimir K. Dubovy**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [W-1235-2017](https://orcid.org/0000-0002-2903-3872),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: [ilonichka3377@mail.ru](mailto:ilonichka3377@mail.ru), [demyantseva@mail.ru](mailto:demyantseva@mail.ru), [zz1234567@yandex.ru](mailto:zz1234567@yandex.ru)

**Original article** / Received on April 23, 2020 / Accepted on June 18, 2020

**Abstract.** Currently, the main trend of the pulp and paper industry development is bio-refining. It is based on integrated and deep processing of wood raw materials to obtain products with higher value added and reduced amount of waste. One of the high priority tasks of bio-refining is improvement of technology of by-product (sulphate soap) extraction from spent liquor with an increase in the yield and quality of the resulting product and a decrease in the level of environmental pollution. The complexity and energy intensity of sulphate soap extraction from spent liquor depends on many factors, including the species used for wood cooking, composition of extractives, the method of wood preparation for delignification, etc. Sulphate soap is a multicomponent emulsion with a predominant content of resin and fatty acids, small amount of unsaponifiable substances and an admixture of lignin, which is mainly extracted from waste liquor by settling. The low degree of its extraction is associated with the absence of systematical data on the mutual influence of the sulphate soap components. In this work, the patterns of intermolecular interaction of the individual components of the by-product (sulphate soap) are found. For this purposes the critical concentration of micelle formation (CCM) and surface tension depression of surface-active sodium oleate and sodium abietate and their mixtures of varying compositions were determined by the methods of tensiometry and conductometry. A detailed analysis of its mixed micelles and adsorption layers was carried out using the Rubin–Rosen pseudophase model. The interaction mechanisms of components in mixtures are explained. The impact on the composition of micelles and adsorption layers of the more surface-active sodium oleate was detected in mixed solutions. A maximum synergistic effect of micelle formation was observed in mixtures with a predominant content of sodium abietate. Analysis of experimental data and the result of sulphate soap modeling allow substantiating the complexity of its extraction from waste liquor after wood cooking with the presence of hardwood over 30 %, which is explained by the reduced content of resin acids in black liquor.

**For citation:** Yakubova O.S., Demiantseva E.Yu., Smit R.A., Dubovy V.K. Analysis of Micelle Formation and Adsorption Layers of Binary Mixtures of Sulphate Soap Components.

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

*Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 196–205. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-196-205

*Keywords:* sulphate soap, black liquor, sodium oleate, sodium abietate, Rubin–Rosen pseudophase model.

### *Введение*

В процессе сульфатной делигнификации древесины происходит химическое превращение экстрактивных веществ, часть которых выделяется в виде сульфатного мыла из отработанных щелоков. В результате его дальнейшей переработки получают лесохимические продукты, такие как талловое масло, талловую канифоль, фитостерин и др. [1, 3, 9–18, 21].

Сульфатное мыло в черном щелоке представляет собой эмульсию многокомпонентного состава с преимущественным содержанием смоляных и жирных кислот, небольшим количеством неомыляемых веществ и примесью лигнина [2–7, 10]. Из литературы известно о множестве работ, направленных на интенсификацию извлечения сульфатного мыла из отработанных растворов [9, 11–14]. Тем не менее данных по исследованию закономерностей межмолекулярного взаимодействия индивидуальных компонентов, являющихся основой для разработки технологии, недостаточно.

Моделирование структуры и свойств систем смешанного состава, как правило, базируется на изучении процессов мицеллообразования и адсорбции веществ на различных границах раздела фаз [22]. В связи с этим в работе была оценена возможность термодинамического описания поведения мицеллярных растворов основных компонентов сульфатного мыла (олеата натрия и абиетата натрия) с применением псевдофазной модели мицеллообразования Рубина–Розена [16]. Данная модель позволит теоретически обосновать закономерности межмолекулярного взаимодействия веществ при выделении сульфатного мыла из отработанных щелоков.

### *Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования были выбраны: олеат натрия – химически чистое анионное поверхностно-активное вещество (АПАВ); абиетат натрия – АПАВ ООО «ГОШ-лаборатория», химически чистое; сульфатное облагороженное мыло АО «Сегежский ЦБК», представляющее собой смесь приблизительно равных количеств натриевых солей смоляных и жирных кислот, очищенную от окисленных и неомыляемых веществ. Выбор такого типа мыла обусловлен необходимостью проведения сравнительного анализа моделируемых систем с реальным производственным продуктом.

Изучение коллоидно-химических характеристик растворов ПАВ проводилось тензиометрическим методом отрыва кольца Дю-Нуи [6]. Диаметр платинового кольца составил 22 мм. Для приготовления растворов использовали дистиллированную воду с удельной электропроводностью 3 мкСм/см. На всех полученных изотермах поверхностного натяжения отсутствует минимум, характерный для примесей, поэтому объекты исследования дополнительной очистке не подвергались. Измерение удельной электропроводности проводили на кондуктометре «Эксперт 002». Погрешность измерения поверхностного натяжения и удельной электропроводности составила 5 %.

Степень достоверности результатов работы обеспечена 3-кратным повторением экспериментов и их воспроизводимостью.

На основании модели псевдофазного разделения Рубина–Розена можно рассчитать коэффициенты активности в смешанных мицеллах, определить их состав и параметр взаимодействия. В основе данного подхода лежит теория регулярных растворов. Считается, что парциальные энтропии компонентов в смешанной мицелле равны парциальным энтропиям компонентов идеальной мицеллы, а энтальпия смешения отлична от нуля [16]. Тогда для коэффициентов активности ПАВ в смешанной мицелле можно записать:

$$f_1 = \exp \beta^m (1 - X_1^m)^2;$$

$$f_2 = \exp \beta^m (X_1^m)^2,$$

где  $\beta^m$  – параметр взаимодействия;  $X_1^m$  – мольная доля 1-го компонента в мицелле.

Отсюда получаем

$$\frac{(X_1^m)^2 \ln \left( \infty \frac{C_{12}^m}{X_1^m C_1^m} \right)}{(1 - X_1^m)^2 \ln \left( \frac{(1 - \infty) C_{12}^m}{(1 - X_1^m) C_2^m} \right)} = 1,$$

где  $C$  – концентрация, %.

Определив экспериментально критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ) для индивидуальных ПАВ и их смесей, при численном решении данного уравнения находят  $X_1^m$ .

Подставив полученные значения  $X_1^m$  в уравнение

$$\beta^m = \frac{\ln \left( \infty \frac{C_{12}^m}{X_1^m C_1^m} \right)}{(1 - X_1^m)^2},$$

находят параметр взаимодействия ПАВ в смешанных мицеллах.

Для осуществления расчетов на изотермах поверхностного натяжения проводят сечение  $\sigma = \text{const}$  и по точкам пересечения этой прямой с изотермами поверхностного натяжения определяют концентрации растворов индивидуальных ПАВ ( $C_1$  и  $C_2$ ) и смесей  $C_{12}$ , при которых достигается выбранное значение поверхностного натяжения. Полученные значения подставляют в уравнения

$$\frac{(X_1^\sigma)^2 \ln \left( \infty \frac{C_{12}^\sigma}{X_1^\sigma C_1^\sigma} \right)}{(1 - X_1^\sigma)^2 \ln \left( \frac{(1 - \infty) C_{12}^\sigma}{(1 - X_1^\sigma) C_2^\sigma} \right)} = 1;$$

$$\beta^\sigma = \frac{\ln \left( \infty \frac{C_{12}^\sigma}{X_1^\sigma C_1^\sigma} \right)}{(1 - X_1^\sigma)^2}$$

и находят  $X_1^\sigma$  и  $\beta^\sigma$ .

Результаты исследования и их обсуждение

Для описания процесса мицеллообразования тензиометрическим методом измерены поверхностные натяжения индивидуальных веществ и их смесей. Результаты представлены на рис. 1.

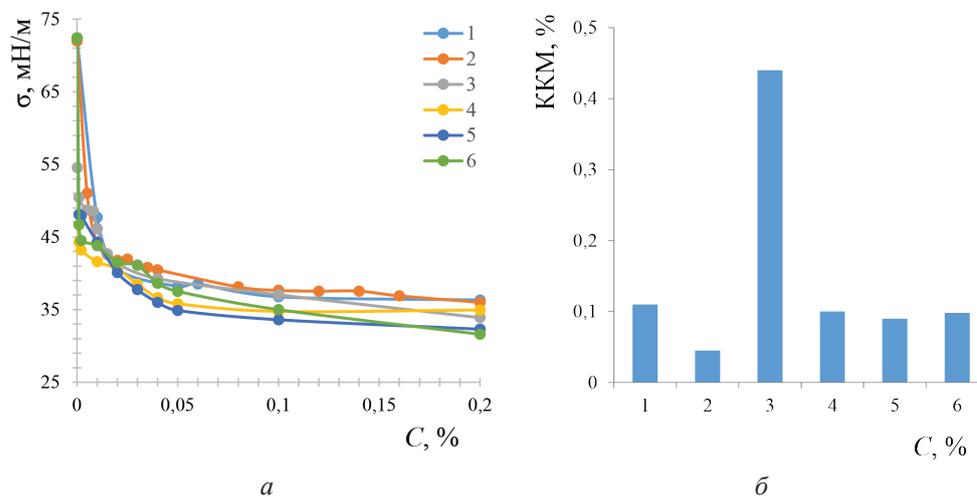


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения (*a*) и ККМ (*б*) от концентрации: 1 – облагороженного сульфатного мыла; 2 – олеата натрия; 3 – абиетата натрия; 4 – смеси абиетата натрия и олеата натрия (90:10); 5 – смеси абиетата натрия и олеата натрия (50:50); 6 – смеси абиетата натрия и олеата натрия (80:20)

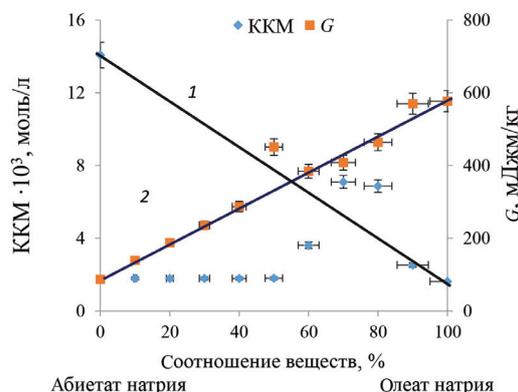
Fig. 1. Dependence of surface tension (*a*) and CCM (*б*) on concentration: 1 – treated sulphate soap; 2 – sodium oleate; 3 – sodium abietate; 4 – mixture of sodium abietate and sodium oleate (90:10); 5 – mixture of sodium abietate and sodium oleate (50:50); 6 – mixture of sodium abietate and sodium oleate (80:20)

Как видно из рис. 1, изотермы поверхностного натяжения растворов олеата и абиетата натрия на границе раздела фаз жидкость–газ имеют вид, характерный для классических ПАВ. С ростом концентрации веществ поверхностное натяжение сначала снижается, а при достижении ККМ принимает постоянное значение. Депрессия поверхностного натяжения абиетата натрия составила 38 мН/м, олеата натрия – 40 мН/м, а в смесях олеата и абиетата натрия – 38...40 мН/м, для сульфатного мыла – 40 мН/м. ККМ олеата натрия соответствует 0,045 %, абиетата натрия – 0,440 %, облагороженного сульфатного мыла – 0,110 %. В растворе олеата натрия начало образования мицелл происходит при меньших концентрациях, чем в растворе абиетата, что согласуется с литературными данными [8, 19, 20].

Для установления взаимного влияния модельных компонентов на процесс формирования сульфатного мыла были получены экспериментальные данные поверхностного натяжения смесей олеата и абиетата натрия при различных соотношениях компонентов. Зависимости ККМ и поверхностной активности от состава смесей представлены на рис. 2.

Рис. 2. Критическая концентрация мицеллообразования, моль/л, и поверхностная активность ( $G$ ), мДжм/кг, смесей различного состава олеата и абиетата натрия: 1 и 2 – прямые аддитивных значений ККМ и  $G$

Fig. 2. CCM (mol/L) and surface activity ( $G$ , mJm/kg) of mixtures of various composition of sodium oleate and sodium abietate: 1 and 2 – straight lines of additive values of CCM and  $G$



Как видно из рис. 2, при преимущественном содержании олеата натрия ККМ и поверхностная активность близки к аддитивным значениям. Однако при введении добавки абиетата натрия более 50 % наблюдается синергизм в мицеллообразовании, т. е. агрегация веществ в бинарных смесях происходит при более низких концентрациях.

На основании псевдофазной модели Рубина–Розена рассчитаны параметры взаимодействия в смешанных мицеллах и адсорбционных слоях. Данные приведены в таблице.

#### Параметры взаимодействия в смешанных мицеллах и адсорбционных слоях олеата и абиетата натрия

| Мольная доля олеата натрия в смеси | $X_1^m$ | $\beta^m$ | $X_1^\sigma$ | $\beta^\sigma \cdot 10^4$ |
|------------------------------------|---------|-----------|--------------|---------------------------|
| 0,11                               | 0,51    | -5,91     | 0,98         | -20                       |
| 0,22                               | 0,57    | -4,57     | 0,97         | -10                       |
| 0,32                               | 0,62    | -3,97     | 0,96         | -10                       |
| 0,43                               | 0,67    | -3,27     | 0,96         | -9                        |
| 0,53                               | 0,73    | -2,94     | 0,96         | -6                        |

Для всех изученных смесей при любом соотношении ПАВ мицеллы обогащены олеатом натрия. Это свойственно системам, компоненты которых существенно отличаются ККМ. Наибольшее взаимодействие ( $\beta = -5,91$ ) наблюдается при содержании абиетата натрия более 80 %. С увеличением его концентрации в растворе начинает повышаться и содержание данного органического вещества в смешанной мицелле – абиетат натрия с разветвленным углеводородным радикалом создает стерические препятствия для проникновения в ядро мицеллы молекул олеата натрия.

По данным удельной электропроводности, в зависимости от состава смеси (рис. 3) с увеличением доли абиетата натрия полярные группы мицеллы начинают частично экранироваться углеводородными радикалами, при этом уменьшается степень диссоциации. В результате снижение взаимного электростатического отталкивания ионогенных групп приводит к улучшению мицеллообразующих свойств в смешанной мицелле.

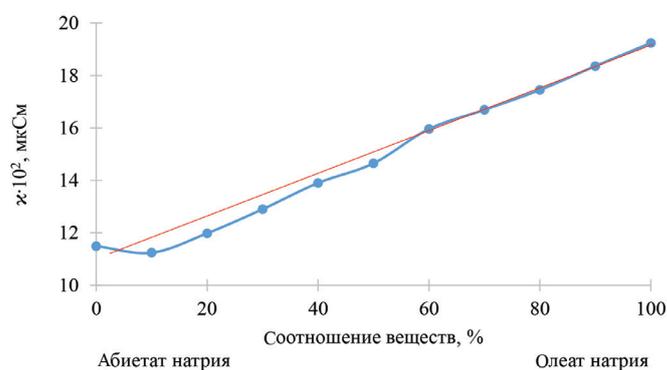


Рис. 3. Зависимость удельной электропроводности от состава смеси абиеата и олеата натрия (прямая линия – аддитивные значения)

Fig. 3. Dependence of specific conductance on the composition of the mixture of sodium abietate and sodium oleate (straight line – additive values)

На основании теории регулярных растворов можно предложить модель смешанной мицеллы при синергическом соотношении компонентов в ней (рис. 4).

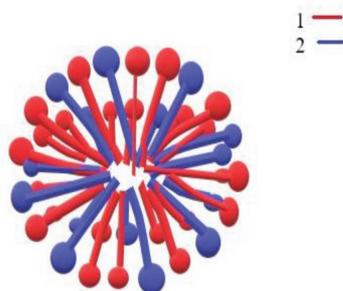


Рис. 4. Модель синергической смешанной мицеллы олеата натрия (1) и абиеата натрия (2)

Fig. 4. Model of synergistic mixed micelle of sodium oleate (1) and sodium abietate (2)

При данных соотношениях компонентов их ККМ соответствует ККМ облагороженного сульфатного мыла (рис. 1, б). Присутствие неомыляемых веществ в сульфатном мыле, выделенном из отработанных растворов, снижает мицеллообразующую способность натриевых солей высших органических кислот [2], но характер взаимодействия между основными поверхностно-активными компонентами мыла сохраняется.

Для определения параметров взаимодействия и состава веществ в смешанных адсорбционных слоях на изотермах поверхностного натяжения индивидуальных компонентов и их смесей выбрано сечение 30 мН/м и рассчитаны значения  $\beta^\sigma$ , мольная доля олеата натрия  $X_1^\sigma$ , данные приведены в таблице.

Небольшие значения  $\beta^\sigma$  в смешанной системе свидетельствуют об аддитивном характере взаимодействия веществ в адсорбционном слое. Мольная доля олеата натрия показывает, что адсорбционный слой больше чем на 90 % заполнен молекулами олеата натрия. Согласно данным по поверхностному натяжению растворов сульфатного мыла, адсорбционный слой, по-видимому, и в этом случае практически полностью обогащен молекулами олеата натрия. Таким образом, на поведение смешанных растворов влияет более сильное ПАВ (олеат натрия), которое вытесняет менее поверхностно-активный компонент (абиеат натрия) из адсорбционных слоев.

*Заключение*

Выявлены закономерности межмолекулярного взаимодействия компонентов сульфатного мыла (олеата натрия и абиетата натрия). На основании псевдофазной модели Рубина–Розена показано превалирование влияния олеата натрия в формировании смешанных мицелл и адсорбционных слоев. Однако синергетический эффект в процессе мицеллообразования наблюдали в смесях и при содержании абиетата натрия более 50 %. Данные результаты объясняют низкую степень извлечения сульфатного мыла после делигнификации сырья с присутствием более 30 % листовых пород древесины: причиной этого становится пониженное содержание смоляных кислот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аким Э.Л. Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) в мире и в России // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы II междунар. науч.-техн. конф. Т. 3. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. С. 198–202. Akim E.L. Pulp and Paper Industry in the World and in Russia. *Proceedings of the Second International Scientific and Engineering Conference "Forests of Russia: Politics, Industry, Science, and Education"*. Vol. 3. Saint Petersburg, SPbGLTU Publ., 2017, pp. 198–202.
2. Андранович О.С., Демьянцева Е.Ю., Филиппов А.П., Смит Р.А. Деэмульгирование сульфатного мыла при введении неионогенного поверхностно-активного вещества // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 224–232. Andranovich O.S., Demiantseva E.Yu., Filippov A.P., Smit R.A. Sulphate Soap Demulsifying with Addition of Non-Ionic Surfactant. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 224–232. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.224>
3. Богомолов Б.Д., Буцаленко В.С., Остащенко М.И., Мариёв А.А. Направление использования таллового пека // Лесохимия и подсочка: обзор. информ. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1989. № 1. 28 с. Bogomolov B.D., Butsalenko V.S., Ostashenko M.I., Mariyev A.A. Direction of Use of Tall Oil Pitch. *Lesokhimiya i podsochka (obzornaya informatsiya)*, 1989, no. 1. 28 p.
4. Владимиров Т.М., Соколов О.М., Третьяков С.И. Повышение выхода экстрактивных веществ дерева в процессе щелочной делигнификации // Физикохимия лигнина. Архангельск, 2005. С. 157–160. Vladimirova T.M., Sokolov O.M., Tret'yakov S.I. Increasing the Yield of Wood Extractives in Alkaline Delignification. *Proceedings of the International Conference "Physical Chemistry of Lignin"*. Arkhangelsk, 2005, pp. 157–160.
5. Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И., Соколов О.М., Кутакова Н.А., Селянина Л.И. Комплексная химическая переработка древесины / под ред. И.Н. Ковернинского. Архангельск: АГТУ, 2002. 347 с. Koverninskiy I.N., Komarov V.I., Tret'yakov S.I., Bogdanovich N.I., Sokolov O.M., Kutakova N.A., Selyanina L.I. *Complex Chemical Processing of Wood*. Ed. by I.N. Koverninskiy. ASTU Publ., 2002. 347 p.
6. Осовская И.И., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С. Определение поверхностного натяжения методом отрыва кольца Дю-Нуи. СПб.: СПбГУПТД, 2016. 24 с. Osovskaya I.I., Dem'yantseva E.Yu., Andranovich O.S. *Determination of Surface Tension by the Anchor-Ring Method (Du Nui Method): Study Guide*. Saint Petersburg, VShTE SPbGUPTD Publ., 2016. 24 p.

7. Старжинская Е.В., Кряжев А.М., Третьяков С.И., Глуханов А.А. Промывка смешанного сульфатного мыла нейтрализованной кислой водой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 194–202. Starzhinskaya E.V., Kryazhev A.M., Tret'yakov S.I., Glukhanov A.A. Mixed Sulfate Soap Washing with Neutralized Spent Acid. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 194–202. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.194>

8. Труфанова М.В., Селянина С.Б., Афанасьев Н.И. Влияние сульфатного лигнина ели на коллоидно-химические свойства основных компонентов сульфатного мыла (сообщение 1) // Химия растит. сырья. 2010. № 2. С. 23–26. Trufanova M.V., Selyanina S.B., Afanas'yev N.I. The Effect of Spruce Sulphate Lignin on the Colloid-Chemical Properties of Mixtures of the Main Components of Sulphate Soap (Report 1). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2010, no. 2, pp. 23–26.

9. Фейгус Э.И., Змачинская Н.Е. Выделение и сбор сульфатного мыла // Целлюлоза. Бумага. Картон: обзор. информ. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1990. № 9. 48 с. Feigus E.I., Zmachinskaya N.E. Sulphate Soap Isolation and Skimming. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton (obzornaya informatsiya)*, 1990, no. 9. 48 p.

10. Филиппов Б.С. О выделении сульфатного мыла из черных щелоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 1964. № 1. С. 154–158. Filippov B.S. On the Isolation of Sulphate Soap from Black Liquor. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1964, no. 1, pp. 154–158. URL: [lesnoizhurnal.ru/apxiv/1964](http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1964)

11. Филиппов Б.С. Оценка состава смолистых веществ сульфатного мыла // Изв. вузов. Лесн. журн. 1973. № 5. С. 102–105. Filippov B.S. Assessment of the Composition of Resinous Substances of Sulphate Soap. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1973, no. 5, pp. 102–105. URL: [lesnoizhurnal.ru/apxiv/1973/5-1973](http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1973/5-1973)

12. Царев Г.И., Некрасова В.Б. Побочные продукты производства сульфатной целлюлозы и их использование при получении древесных плит // Лесохимия и подсокка: обзор. информ. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1985. № 3. 40 с. Tsarev G.I. Nekrasova V.B. Sulphate Pulp Production By-Products and Their Use in the Production of Wood-Based Panels. *Lesokhimiya i podsochka (obzornaya informatsiya)*, 1985, no. 3. 40 p.

13. Цветков А.А., Богданович Н.И., Селянина С.Б. Извлечение сульфатного мыла, как способ увеличения эффективности работы предприятия ЦБП // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2014. № 7. С. 58–61. Tsvetkov A.A., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B. Removing of Sulphate Soap as a Way to Increase the Efficiency of Pulp and Paper Enterprises. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2014, no. 7, pp. 58–61.

14. Шеломенцев В.В., Ведерников Д.Н., Старжинская Е.В. Выделение нейтральных веществ хвойного и лиственных сульфатных мыл // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IV междунар. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. С. 327–329. Shelomentsev V.V., Vedernikov D.N., Starzhinskaya E.V. Isolation of Neutral Substances of Coniferous and Deciduous Sulphate Soaps. *Proceedings of the Fourth International Scientific and Engineering Conference "Forests of Russia: Politics, Industry, Science, and Education"*. Saint Petersburg, SPbGLTU Publ., 2019, pp. 327–329.

15. Evdokimov A.N., Kurzin A.V., Trifonova A.D., Popova L.M., Buisman G.J.H. Desulfurization of Black Liquor Soap for Production of Crude Tall Oil with Lower Sulfur Content. *Wood Science and Technology*, 2017, vol. 51, iss. 6, pp. 1353–1363. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0912-y>

16. Gu X.-F., Huo J., Wang R.-T., Wu D.-C., Yan Y.-L. Synergism in Mixed Zwitterionic Surface Activity Ionic Liquid and Anionic Surfactant Solution: Analysis of Interfacial and Micellar Behavior. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2014, vol. 36, iss. 3, pp. 334–342. DOI: <https://doi.org/10.1080/01932691.2014.901915>

17. Huibers D.T.A., Rogers R.R. Environmental Aspects of Tall Oil Distillation. *INFORM: International News on Fats, Oils and Related Materials*, 1994, no. 4. 526 p.

18. Prado F.I. Air Emissions Aspects, Tall Oil Plants. *INFORM: International News on Fats, Oils and Related Materials*, 1994, no. 4. 526 p.

19. Selyanina S.B., Makarevich N.A., Tel'tevskaya S.E., Afanas'eva N.I., Selivanova N.V. Influence of Adsorption of Lignosulfonates on Kraft Lignin in the Presence of Tall Oil on Separation of Water-Tall Oil Emulsion. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2002, vol. 75, iss. 11, pp. 1873–1877. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022243010785>

20. Selyanina S.B., Selivanova N.V., Afanasiev N.I., Trufanova M.V. The Model Investigations of the Behavior of Heterogeneous Systems with Participation of Lignin and Extractive Substances. *Proceedings of the 8th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp (EWLP 2004)*. Riga, 2004, pp. 285–289.

21. Tikka P., Kovasin K., Laxén T. Solving Soap and Turpentine Related Process Problems in Softwood Kraft Mills. *Pulp and Paper Canada*, 2002, vol. 103(6), pp. 30–35.

22. Zubarev A.Yu., Iskakova L.Yu. To the Theory of the Aggregation of Polydisperse Colloids. *Colloid Journal*, 2004, vol. 66, iss. 3, pp. 296–301. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:COLL.0000030839.66688.ca>

## Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2021 г.

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

**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. № 2-21.

**Rybashlykova L.P., Lepesko V.V.** Assessment of Natural and Forest Reclaimed Forage Lands in Semi-Desert Conditions in Southern Russia. № 3-37.

**Savchenkova V.A., Vasilyev S.B., Nikitin V.F., Aksenov P.A.** Productivity of Forest Plantation Crops. № 1-35.

**Udval B., Gerelbaatar S., Dashzeveg Ts., Lobanov A.I.** Seed Quality of *Larix sibirica* Ledeb. Depending on the Distance between Forest Areas and Pollution Sources around Ulaanbaatar City of Mongolia. № 4-23.

**Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П.** Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор). № 3-73.

**Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов П.В.** Дифференциация пылезадерживающей способности кроны тополей. № 5-48.

**Гавриков В.Л., Фертиков А.И., Шарафутдинов Р.А., Ваганов Е.А.** Изменчивость элементного состава годичных колец хвойных пород. № 6-24.

**Гордеева Г.Н.** Успешность интродукции редких растений в дендрарии Хакасии. № 3-24.

**Горошкевич С.Н.** Метеорологическая обусловленность семеношения кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour). № 2-56.

**Данчева А.В., Панкратов В.К.** Оценка эффективности рубок ухода в сухих сосняках Казахского мелкосопочника. № 2-45.

**Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Васильева Н.Н.** Представители семейства сосновые (*Pinaceae* Lindl.) североамериканской флоры в коллекции дендрологического сада ФБУ «СевНИИЛХ». № 4-36.

**Егоров А.Б., Постников А.М., Бубнов А.А., Павлюченкова Л.Н., Партолина А.Н.** Выращивание культур ели с применением современных гербицидов, не требующее проведения агротехнических уходов. № 3-9.

**Залесов С.В., Белов Л.А., Оплетев А.С., Магасумова А.Г., Карташова Т.Ю., Дебков Н.М.** Формирование кедровников рубками ухода на бывших сельскохозяйственных угодьях. № 1-9.

**Зарипов Ю.В., Залесов С.В., Залесова Е.С., Попов А.С., Платонов Е.П., Стародубцева Н.И.** Подрост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на отвалах месторождения хризотил-асбеста. № 5-22.

**Зарубина Л.В., Хамитов Р.С.** Сезонный рост сосны обыкновенной на заболоченных почвах Севера. № 3-86.

**Иванов В.П., Марченко С.И., Нартов Д.И., Балухта Л.П.** Радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при ингибировании. № 1-69.

**Кищенко И.Т., Ольхина Е.С.** Рост вегетативных органов *Picea abies* (L.) Karst. в антропогенной среде. № 3-59.

**Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Грибов С.Е., Иванова М.Г., Беляков Д.В.** Лесоводственно-хозяйственная оценка объектов биологического разнообразия в таежной зоне. № 6-110.

**Кострикин В.А., Ширнин В.К., Крюкова С.А.** Критерии оценки плюсовых насаждений дуба. № 4-68.

**Кошелева О.Ю.** Районирование водосборов малых рек юга Приволжской возвышенности по водоохранно-защитной роли лесов. № 1-99.

**Кузнецова Н.Ф., Клушевская Е.С., Аминова Е.Ю.** Высокопродуктивные сосновые леса в условиях изменяющегося климата. № 6-9.

**Кутявин И.Н., Манов А.В., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А.** Строение древостоев северотаежных сосняков. № 2-86.

**Макаров С.С., Тяк Г.В., Кузнецова И.Б., Чудецкий А.И., Цареградская С.Ю.** Получение посадочного материала *Rubus arcticus* L. методом клонального микроразмножения. № 6-89.

**Мамедалиева В.М.** Алгоритм и оценка изменения площади лесного покрова Хачмазского района Азербайджана средствами космического мониторинга. № 2-106.

**Мочалов Б.А., Бобушкина С.В.** Лесокультурное производство – основа непрерывности лесопользования. № 4-80.

**Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н.** Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях. № 1-46.

**Нгуен Тхи Иен, Данг Ван Ха, Паринова Т.А.** Видовое разнообразие и декоративные особенности растений в озеленении города Ханой. № 5-65.

**Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б.** Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин. № 4-9.

**Овчинникова Н.Ф.** Особенности пространственно-временной структуры соснового древостоя на южном склоне Восточного Саяна. № 5-34.

**Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Богданов А.П., Цветков И.В.** Таблицы объемов стволов по разрядам высот ивы древовидной северотаежного района европейской части Российской Федерации. № 6-69.

**Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А., Козловский Е.Е., Грищенко М.Ю.** Защита еловых лесов от вспышек *Ips typographus* (обзор). № 4-55.

**Попов П.П., Казанцева М.Н., Арефьев С.П.** Фенотипическая структура популяций ели на Европейском Севере России. № 2-9.

**Примаков Н.В.** Изменчивость лесоводственных характеристик полезащитных лесных насаждений Краснодарского края. № 1-60.

**Семкина Л.А., Тишкина Е.А.** Рост и продуктивность инорайонных древесных видов в условиях Среднего Урала. № 6-100.

**Скок А.В., Сорокопудов В.Н., Глазун И.Н.** Влияние хронического ионизирующего излучения на вариабельность митотической активности тканей *Pinus silvestris* L. № 1-112.

**Станкевич Т.С.** Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса. № 1-20.

**Сунгурова Н.Р., Дрочкова А.А.** Биометрические характеристики посадочного материала как тест-показатель успешности культур *Pinus silvestris* L. № 4-107.

**Суховольский В.Г., Воронин В.И., Осколков В.А., Ковалев А.В.** Экспресс-оценка физиологического состояния древесных растений по диэлектрическим характеристикам тканей ствола. № 2-70.

**Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е.** Особенности адаптации разных форм сосны обыкновенной в условиях длительного избыточного увлажнения почв. № 2-30.

**Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К.** Оценка культур кедрового сибирского в конце первого класса возраста. № 6-56.

**Турусов В.И., Чеканышкин А.С., Лепёхин А.А.** Рост и состояние смешанных древостоев лесных насаждений Каменной Степи. № 4-97.

**Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Адаи Д.М.** Теплотворная способность древесины сосны в культурах северотаежного лесного региона. № 1-82.

**Усольцев В.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Цепордей И.С.** Модель объема ствола ивы: метаанализ. № 3-49.

**Фан Чонг Хуан, Ковязин В.Ф., Звонарёва С.С., Нгуен Тхи Хай Тхань, Нгуен Тхи Лан.** Физико-химические свойства почв мангровых лесов Вьетнама. № 5-9.

**Федорков А.Л.** Объем и качество ствола гибридной и обычной осины в клоновом архиве. № 1-92.

**Царев А.П., Лаур Н.В., Царев В.А., Царева Р.П.** Современное состояние лесной селекции в Российской Федерации: тренд последних десятилетий. № 6-38.

**Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов С.Е., Татарин Д.С.** Технология воспроизводства пихты для получения хвойной лапки. № 6-79.

**Чеве́рдин Ю.И., Беспалов В.А., Сауткина М.Ю., Титова Т.В.** Эколого-агрохимическая оценка почв Каменной Степи под лесным ценозом. № 5-76.

### ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

**Hintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L.** Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review). № 5-92.

**Абузов А.В., Рябухин П.Б.** Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях. № 4-117.

**Арико С.Е., Войнаш С.А., Кононович Д.А., Соколова В.А.** Мощностные характеристики узлов мульчера при удалении древесно-кустарниковой растительности. № 2-130.

**Базаров С.М., Беленький Ю.И., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф.** Системный анализ технологической эффективности колесного сортиментоподборщика. № 2-116.

**Баргенов И.М., Драпалюк М.В.** Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов. № 5-117.

**Боровлев А.О., Скрышников А.В., Козлов В.Г., Тюрикова Т.В., Тверитнев О.Н., Никитин В.В.** Математическое моделирование трассы лесовозных автомобильных дорог. № 4-150.

**Бурми́строва О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунева Е.Н.** Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты. № 3-101.

**Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Побединский В.В., Терин Н.Н., Уразова А.Ф.** Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства. № 1-138.

**Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Никончук А.В.** Оценка влияния пожаров на лесные экосистемы с уче-

том уровня развития лесотранспортной сети. № 4-131.

**Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Шевелева Е.В.** Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров. № 6-135.

**Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И.** Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах. № 6-121.

**Рукомойников К.П., Купцова В.О.** Модернизация конструкции механизма для очистки деревьев от сучьев многооперационными лесными машинами. № 3-117.

**Шегельман И.Р., Будник П.В.** Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа. № 1-120.

### МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

**Fedyukov V.I., Chernov V.Yu., Chernova M.S., Tsoy O.V.** Interrelations of Wood Physical and Mechanical Properties and Patterns of their Change within the Birch Stem. № 6-150.

**Алексеев А.Е., Думанский И.О., Прохоров А.В.** Пластинчатые амортизаторы-демпферы в натяжных устройствах ленточнопильных станков. № 5-142.

**Буглаев А.М.** Электроискровое упрочнение дереворежущего инструмента. № 5-134.

**Зырянов М.А., Медведев С.О., Мохирев А.П.** Влияние добавки измельченной хвои на качественные показатели древесноволокнистой плиты. № 3-125.

**Капустина Н.А., Малыгин В.И., Мелехов В.И., Слуцков В.А.** Моделирование дискретных контактов термодинамической системы элементов сборной дереворежущей фрезы. № 4-162.

**Любов В.К., Владимиров А.М.** Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках. № 1-159.

**Огурцов В.В., Каргина Е.В., Матвеева И.С.** Оптимизация дробности сортировки бревен по диаметру. № 1-150.

**Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Памфилов Е.А., Данилюк А.Я., Капустин В.В.** Повышение работоспособности древесно-металлических подшипников скольжения лесопромышленных машин. № 2-156.

**Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., Сафин Р.Г., Хабибуллина А.Р.** Физико-механические характеристики термодревесной композиции из древесины сосны при баротермической обработке. № 2-143.

**Соколова Е.Г., Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н.** Влияние аэрозоля технического на свойства клеевых композиций. № 3-133.

**Торопов А.С., Бызов В.Е., Торопова Е.В., Сергеевичев А.В., Сазанова Е.В.** Раскрой круглых сортиментов с ядровой гнилью на конструкционные пиломатериалы. № 6-160.

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

**Pranovich A.V., Antonov O.I., Dobrovolsky A.A.** Pruning Influence on Chemical Composition of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) Karst.). № 3-145.

**Rech D., Potasheva A.N., Kazakov Ya.V.** Regulating the Deformation Properties of Paper by Varying the Degree of Its Anisotropy. № 5-174.

**Sabirova G.A., Safin R.R., Galyavetdinov N.R., Shaikhutdinova A.R., Khayrullin R.Z.** Studing the Rheological Properties of Polylactide Melt Mixed with Wood Filler. № 1-173.

**Анискин С.В., Куров В.С.** Динамические характеристики скорости истечения жидкости из форсунок в струйных газопромывателях целлюлозного производства. № 2-180.

**Воронцов К.Б., Богданович Н.И., Седова Е.Л., Соловьева П.В.** Формирование адсорбционных свойств углеродных наноструктурированных материалов термохимической активации шлам-лигнина. № 4-181.

**Королева Т.А., Миловидова Л.А., Дряхлицын А.А.** Получение лиственной целлюлозы высокого выхода бисульфитным способом. № 3-161.

**Макаревич Н.А.** Фактор неидеальности в энтропийно-мультифрактальном анализе самоорганизованных структур растительных полимеров (лигнинов). № 2-194.

**Миксон Д.С., Рошин В.И.** Углеводороды и сложные эфиры экстрактивных веществ хвои лиственницы сибирской. № 3-170.

**Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Канарская З.А., Канарский А.В.** Применение сульфитных щелоков в качестве питательной среды для культивирования продуцента молочной кислоты *Rhizopus oryzae F-1030*. № 5-163.

**Плахин В.А., Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А.** Синтез коллоидного серебра с использованием лигносульфонатов. № 6-184.

**Севастьянова Ю.В., Топтунов Е.А., Щербак Н.В., Солнцев П.В.** Определение математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ (хвойная ЦВВ). № 1-192.

**Сиваков В.П., Вураско А.В., Куцубина Н.В.** Экспериментальное и теоретическое исследование тепловых потерь в сушильных цилиндрах. № 2-169.

**Сизов А.И., Пименов С.Д., Строитель А.Д., Строитель Е.Д.** Отбелка микрокристаллической целлюлозы, полученной методом газофазного гидролиза. № 6-173.

**Смит Р.А., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С., Филиппов А.П.** Особенности солубилизирующего действия амфифильных соединений при обессмоливании сульфатной целлюлозы. № 1-180.

**Сосновская А.А., Флейшер В.Л.** Идентификация кристаллического продукта жидкофазного окисления  $\alpha$ -пинена кислородом воздуха в присутствии стеарата кобальта (II). № 4-173.

**Софронова Е.Д., Липин В.А., Дубовый В.К., Суставова Т.А.** Минимизация содержания хлора в беленой сульфатной целлюлозе для санитарно-гигиенических изделий и упаковки пищевых продуктов. № 3-186.

Хадыко И.А., **Новожилов Е.В.**, Чухчин Д.Г. Влияние предварительной подготовки картона на определение крахмала ферментативным методом. № 5-150.

Якубова О.С., Демьянцева Е.Ю., Смит Р.А., Дубовый В.К. Анализ мицеллообразования и адсорбционных слоев бинарных смесей компонентов сульфатного мыла. № 6-196.

#### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Vabaev R.N. Application of the Adobe Photoshop Software Package in Leaf Blade Area Measurement of Woody Plants. № 5-185.

Дебков Н.М. Опыт создания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой. № 5-192

Евдокимов И.В., Добрынин А.П., Армеева Н.А. Древовидная форма можжевельника (*Juniperus communis* L.) в лесах Вологодской области. № 5-201.

Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Показатель для оценки эффективности организации охраны лесов от пожаров. № 2-213.

Шалаев В.С., Тепляков В.К. К итогам XXV Всемирного конгресса ИЮФРО. № 4-190.